

ESTIMATIVA DA EVOLUÇÃO DOS ASSENTAMENTOS NUMA PLATAFORMA INDUSTRIAL TENDO POR BASE OS VALORES DE ASSENTAMENTOS REGISTADOS

ANA CATARINA ABREU OLIVEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Engenheiro Celso Manuel Relva Martins de
Lima

JULHO DE 2017

Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha mãe

*“Peço-Te que venhas e me dês a liberdade,
Que um só dos teus olhares me purifique e acabe.”*
Sophia de Mello Breyner

Estimativa da Evolução dos Assentamentos numa Plataforma Industrial tendo como Base os valores de assentamentos registados

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho deve-se a várias pessoas a quem quero agradecer, em especial:

Ao Professor Engenheiro Celso Martins de Lima, pela orientação, pela disponibilidade prestada e por ter possibilitado a ligação com a EDP, à qual tenho também que agradecer pela cedência de dados.

A todos os meus amigos, aos que levo da vida de estudante e aos que o são desde sempre, os bons momentos e toda a sincera ajuda.

À minha família, pelo amor e apoio que me foi dedicado, da forma mais simples e sem qualquer julgamento, que tornou todo este percurso mais fácil.

À minha irmã por me fazer crescer todos os dias e pelo amor dado da forma mais pura.

Aos meus pais, por servirem de inspiração e por toda e qualquer ajuda carinhosamente oferecida na minha realização, profissional e pessoal, e especialmente à minha mãe, por ser todos os meus dias e pela ajuda em busca ao mais ínfimo pormenor.

RESUMO

A presente dissertação pretendeu estudar a evolução dos assentamentos por consolidação, até ao fim da vida útil de uma plataforma industrial que já se encontra em funcionamento, a Central termoeleétrica de Lares, localizada num vale aluvionar.

Neste contexto, dividiu-se o presente estudo em duas análises, utilizando para o efeito os dados dos desníveis obtidos por levantamentos topográficos e do enquadramento geotécnico da zona. Complementarmente recorreu-se a teorias encontradas bibliograficamente, que caracterizam o comportamento evolutivo dos assentamentos à superfície por consolidação.

Numa primeira análise abordou-se os assentamentos ocorridos na vedação periférica da Central, que se encontra fundada sobre lintel, assente diretamente sobre o aterro. Com este tipo de fundação, a vedação acompanha os desníveis ocorridos ao longo desta área e, por isso, foi possível verificar a grandeza dos assentamentos detetados no solo.

Numa segunda fase analisou-se os dados relativos às condutas da instalação onde se detetaram roturas, nomeadamente os desníveis ocorridos desde o fim da construção nos maciços estruturais. Após análise pormenorizada, procedeu-se à estimativa dos assentamentos que poderão ocorrer, através de métodos numéricos baseados nas equações que caracterizam a consolidação de solos moles.

Assim, foi possível, em ambas as análises, observar o comportamento de solos localizados em formações aluvionares quando sofrem carregamento, e apresentar uma alternativa ao controlo dos assentamentos através de dados provenientes de medições de natureza topográfica.

PALAVRAS-CHAVE: Vales aluvionares, consolidação, assentamentos, plataforma industrial, monitorização topográfica, enquadramento geológico-geotécnico.

ABSTRACT

The following thesis aimed to study the displacements evolution due to consolidation process, until the end of service life of an industrial platform already working, the thermoelectric Central of Lares, located above of an alluvial deposit.

In the context, two distinct analyses were produced, in which were used data obtained from topographic and geotechnical monitoring of the area, together with bibliographic theories that feature the consolidation settlements evolution.

The first analysis approached the settlements occurred at the Central peripheral area that is established on lintel, directly on the embankment. With this type of foundation, this area will follow the displacements happening on the surface, so it was possible to compare the different settlements detected over the ground.

In the second phase, was done the review of the data about the pipes where occurred breaks, specifically the displacements that occurred since the end of construction of the Central. After the detailed analysis, proceeded the estimation of the settlements that are about to occur, using numerical methods based on equation of soft soil knowledge.

With both cases, it was able to notice the behaviour of alluvial deposit soils when loaded, and show an alternative to the control of settlements employing data from topographic monitoring.

KEY WORDS: Alluvial deposit, consolidation, settlements, industrial platform, geotechnical and topographic monitoring.

Índice

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2 COMPRESSIBILIDADE E CONSOLIDAÇÃO DOS SOLOS MOLES	3
2.1. CARACTERIZAÇÃO DE UM SOLO MOLE	3
2.2. CARREGAMENTO SOB CONFINAMENTO LATERAL	4
2.2.1. ESTRATO CONFINADO	4
2.2.2. ENSAIO EDOMÉTRICO E ANALOGIA DE TERZAGHI	5
2.3. ESTIMATIVA DO ASSENTAMENTO POR CONSOLIDAÇÃO	10
2.3.1. PARÂMETROS QUE DEFINEM A RELAÇÃO TENSÕES-DEFORMAÇÕES	10
2.3.2. CÁLCULO DO ASSENTAMENTO POR CONSOLIDAÇÃO	12
2.4. TEORIA DA CONSOLIDAÇÃO DE TERZAGHI	13
2.5. CONSOLIDAÇÃO SECUNDÁRIA	15
3 CASO DE ESTUDO	19
3.1. DESCRIÇÃO DA CENTRAL DE CICLO COMBINADO DE LARES	19
3.2. LOCALIZAÇÃO DA CENTRAL	20
3.3. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	21
3.3.1. TECTÓNICA	23
3.3.2. LITOESTRATIGRAFIA	23
3.3.3. PROPRIEDADES DOS ALUVIÕES MOLES DO BAIXO MONDEGO	29
4 ASSENTAMENTOS NA VEDAÇÃO PERIFÉRICA DA CENTRAL DE LARES	35

4.1. INTRODUÇÃO	35
4.2. LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS E RESPETIVOS ASSENTAMENTOS OBTIDOS	35
4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS	39

5 ESTIMATIVA DA EVOLUÇÃO DOS ASSENTAMENTOS NO CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO..... 41

5.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS.....	41
5.1.1. INTRODUÇÃO	41
5.1.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	41
5.1.3. CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO.....	42
5.1.4. AVALIAÇÃO DAS ROTURAS	43
5.1.5. OBJETIVOS	45
5.2. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E RESPETIVOS ASSENTAMENTOS OBTIDOS	45
5.3. MÉTODO UTILIZADO NA ESTIMATIVA DOS ASSENTAMENTOS.....	50
5.3.1. IDENTIFICAÇÃO DA FASE DA CONSOLIDAÇÃO EM QUE O SOLO SE ENCONTRA.....	51
5.3.2. DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DO ASSENTAMENTO POR CONSOLIDAÇÃO SECUNDÁRIA	51
5.4. ESTIMATIVA DO INSTANTE CORRESPONDENTE AO FIM DA CONSOLIDAÇÃO PRIMÁRIA E DA CONSTATANTE “K”	52
5.4.1. PRIMEIRA SIMULAÇÃO, CONSIDERANDO O INSTANTE T1 COINCIDENTE COM A ÉPOCA 0.....	53
5.4.2. SEGUNDA SIMULAÇÃO, CONSIDERANDO O INSTANTE T1 COINCIDENTE COM A ÉPOCA 1.....	55
5.4.3. TERCEIRA SIMULAÇÃO, CONSIDERANDO O INSTANTE T1 COINCIDENTE COM A ÉPOCA 2	57
5.5. ESTIMATIVA DOS ASSENTAMENTOS NOS MACIÇOS DE APOIO DAS CONDUTAS DO CAR	60
5.5.1. ESTIMATIVA DO ASSENTAMENTO SECUNDÁRIO EM MARÇO DE 2040	60
5.5.2. ESTIMATIVA DO ASSENTAMENTO SECUNDÁRIO EM MARÇO DE CADA ANO.....	62
5.5.2.1. Resultados numéricos das estimativas	62
5.5.2.2. Resultados gráficos das estimativas	63
5.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS	67

6 CONCLUSÃO..... 69

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
-----------------------------------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Condições de carregamento de um estrato confinado de argila (Matos Fernandes, 2012)..	5
Figura 2.2 - Representação simplificada do ensaio edométrico (Matos Fernandes, 2012)	5
Figura 2.3 - Modelo analógico proposto por Terzaghi para o carregamento e consolidação de estratos confinados de argila (Matos Fernandes, 2012)	7
Figura 2.4 - Evolução no tempo do estado de tensão num ponto genérico do estrato de argila e do assentamento dado na superfície do terreno (Matos Fernandes, 2012)	9
Figura 2.5 - Diagrama da relação entre a tensão efetiva vertical (em escala logarítmica) e o índice de vazios, obtido através de um ensaio realizado numa amostra de argila do Baixo Mondego (Coelho, 2000)	10
Figura 2.6 - Diagrama $\log \sigma'_v - e$ (Matos Fernandes, 2012)	11
Figura 2.7 - Carregamento de uma argila sobreconsolidada em que o incremento de tensão é superior à tensão de pré-consolidação (Matos Fernandes, 2012)	12
Figura 2.8 - Componentes da velocidade de descarga nas faces de um elemento genérico de solo (Terzaghi <i>et al.</i> , 1996)	13
Figura 2.9 - Solução da equação de consolidação de Terzaghi no caso de dupla fronteira drenante e excesso de pressão neutra inicial constante em toda a espessura do estrato (Matos Fernandes, 2012)..	15
Figura 2.10 - Curva genérica tempo-assentamento de uma fundação (Perloff, 1975 em Matos Fernandes, 2011)	17
Figura 3.1 - Fotografia aérea da Central termoelétrica de Lares (EDP, 2015)	19
Figura 3.2 - Localização da freguesia de Vila Verde, no concelho de Figueira da Foz (Coelho e Ferreira, 2016)	20
Figura 3.3 - Mapa da localização geográfica da Central de Lares (Imagens ©2017 Google).....	21
Figura 3.4 - Extrato da folha 19-C FIGUEIRA DA FOZ da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000 (Serviços Geológicos de Portugal).....	22
Figura 3.5 - Extrato da legenda da folha 19-C FIGUEIRA DA FOZ da Carta Geológica de Portugal (Serviços Geológicos de Portugal)	22
Figura 3.6 - Extrato da Carta Neotectónica de Portugal 1:1 000 000.....	23
Figura 3.7 - Legenda referente aos perfis Geológicos apresentados	24
Figura 3.8 - Planta de Localização do Perfil A-A'	25
Figura 3.9 - Perfil Geológico A-A' representativo de um corte realizado ao longo de todo o comprimento do terreno.....	25
Figura 3.10 - Perfil Geológico C-C', que representa um corte de uma parte da lateral direita do terreno	26
Figura 3.11 - Perfil Geológico C-C', que representa um corte de uma parte da lateral direita do terreno (2)	26

Figura 3.12 - Planta de Localização dos perfis representados na largura do terreno, à escala 1:2500 ..	27
Figura 3.13 - Perfil geológico I-I´ representativo da fronteira a Sul do terreno	27
Figura 3.14 - Perfil geológico H-H´ representativo da largura a meio do terreno	28
Figura 3.15 - Perfil geológico F-F´ representativo da largura a meio do terreno.....	28
Figura 3.16 - Perfil Geológico A-A´ representativo de um corte realizado ao longo do terreno atual, no qual se encontra representado o novo aterro que elevou a cota a 7 metros.....	29
Figura 3.17 - Extrato da folha 19-C FIGUEIRA DA FOZ da Carta Geológica de Portugal (Serviços Geológicos de Portugal), no qual são representadas a Quinta Foja e Lares	30
Figura 3.18 - Características dos solos presentes na Quinta da Foja (Coelho, 2000)	31
Figura 3.19 - Características dos solos presentes na Quinta da Foja (Coelho, 2000) (continuação).....	32
Figura 3.20 - Curva experimental tempo-assentamento de uma argila mole do Baixo Mondego (Coelho, 2000), apresentada por Matos Fernandes, 2012.	33
Figura 4.1 - Representação do mapa da vedação periférica e respetivos pontos, nos quais ocorreram as medições topográficas.....	36
Figura 4.2 - Evolução dos assentamentos de alguns pontos da vedação periférica, obtidos através de levantamentos topográficos realizados desde Junho de 2010 até Agosto de 2016	38
Figura 4.3 - Evolução dos assentamentos ocorridos em todos os pontos alvo de estudo na vedação periférica, ao longo das épocas de medição.....	38
Figura 5.1 - Fotografia aérea da Central de Lares e respetivo circuito de água de refrigeração (EDP, 2016)	42
Figura 5.2 - Localização das roturas no mapa do circuito de refrigeração (EDP,2016)	43
Figura 5.3 - Assentamentos registados no circuito de água de refrigeração em marcas nos maciços de ancoragem e na proximidade à torre de refrigeração.....	44
Figura 5.4 - Esquema representativo de um tubo-biel a (EDP,2016)	45
Figura 5.5 - Representação do mapa da linha e respetivos pontos, nos quais ocorreram medições topográficas	46
Figura 5.6- Ordenação dos assentamentos nos pontos das condutas que abastecem o Grupo 1, obtidos através dos levantamentos topográficos	49
Figura 5.7- Ordenação dos assentamentos nos pontos das condutas que abastecem o Grupo 2, obtidos através dos levantamentos topográficos	49
Figura 5.8 - Curva (final) dos assentamentos medidos de Julho de 2010 até Março de 2016, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 1	50
Figura 5.9 - Curva (final) dos assentamentos medidos de Julho de 2010 até Março de 2016, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 2	50
Figura 5.10 - Valores das variáveis usadas na obtenção da constante “K” e respetivo cálculo, para a época 1	54

Figura 5.11- Gráfico no qual se representam os valores da constante “K” em alguns pontos de medição das condutas CAR, para cada uma das épocas de medição, obtidos usando t_1 correspondente a Julho de 2010	55
Figura 5.12- Representação gráfica, na qual se representam os valores da constante “K” em alguns pontos de medição das condutas do CAR, para cada uma das épocas de medição, obtidos usando t_1 correspondente a Janeiro de 2011	57
Figura 5.13 - Representação gráfica, na qual se representam os valores da constante “K” em alguns pontos da conduta CAR, em cada uma das épocas de medição, obtidos usando t_1 correspondente a Junho de 2011	59
Figura 5.14 - Valores das variáveis usadas na obtenção da constante “K” e respetivo cálculo, em Março de 2040	61
Figura 5.15 - Representação gráfica, sob a forma de linha de tendência, dos assentamentos secundários resultantes das estimativas até 2040, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 1	64
Figura 5.16 - Representação gráfica, sob a forma de linha de tendência, dos assentamentos secundários resultantes das estimativas até 2040, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 2	64
Figura 5.17 - Comparação de assentamentos secundários obtidos através de medições e através de estimativas, em alguns pontos das condutas do CAR.....	65
Figura 5.18 - Representação gráfica dos assentamentos totais até 2040, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 1	65
Figura 5.19 - Representação gráfica dos assentamentos totais até 2040, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 2	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Correspondência entre o modelo de Terzaghi e o carregamento de um estrato confinado (Matos Fernandes, 2012).....	7
Tabela 4.1 - Correspondência das épocas de medições topográficas ao respetivo ano e mês.....	36
Tabela 4.2 - Resultados numéricos dos levantamentos topográficos realizados durante 6 anos de funcionamento da Central de Lares, em cada ponto de medição.....	37
Tabela 5.1 - Correspondência das épocas de medições topográficas ao respetivo Ano e Mês	47
Tabela 5.2- Resultados dos assentamentos ocorridos em cada ponto objeto de estudo na linha H, em mm.....	47
Tabela 5.3- Resultados dos assentamentos ocorridos na linha H, em mm, após seleção dos pontos representativos para o problema em questão.....	48
Tabela 5.4 - Datas referentes aos acontecimentos considerados na primeira simulação de “K”	53
Tabela 5.5 - Valores das variáveis respetivas ao tempo, usados na primeira simulação de “K”, referentes a cada época de medição.....	54
Tabela 5.6- Resultados dos cálculos da constante “K” na primeira simulação, em cada época de medição dos assentamentos, nos pontos das condutas do CAR	54
Tabela 5.7- Resultados dos cálculos do novo assentamento secundário correspondente a cada época de medição.....	56
Tabela 5.8 - Datas referentes aos acontecimentos considerados na segunda simulação de “K”	56
Tabela 5.9 - Valores das variáveis respetivas ao tempo, usados na segunda simulação de “K”, referentes a cada época de medição.....	56
Tabela 5.10 Resultados dos cálculos da constante “K” na segunda simulação, em cada época de medições dos assentamentos, nos pontos das condutas do CAR.....	57
Tabela 5.11- Resultados dos cálculos do novo assentamento secundário correspondente a cada época de medição.....	58
Tabela 5.12 - Datas referentes aos acontecimentos considerados na terceira simulação de “K”	58
Tabela 5.13 - Valores das variáveis respetivas ao tempo, usados na terceira simulação de “K”, referentes a cada época de medição.....	58
Tabela 5.14- Resultados dos cálculos da constante “K” na terceira simulação, em cada época de medições dos assentamentos, nos pontos das condutas do CAR.....	59
Tabela 5.15 - Datas referentes aos acontecimentos considerados na estimativa do assentamento secundário em Março de 2040	60
Tabela 5.16 - Valores das variáveis respetivas ao tempo, usados na estimativa do assentamento secundário em Março de 2040	60
Tabela 5.17- Resultados da estimativa dos assentamentos secundários a ocorrer até Março de 2040 ..	61
Tabela 5.18- Estimativa do assentamento secundário, em Março de cada ano até 2016.....	62

Tabela 5.19- Estimativa do assentamento secundário, em Março de cada ano, desde 2017 até 2030 ..	63
Tabela 5.20- Estimativa do assentamento secundário, em Março de cada ano, desde 2031 até 2040 ..	63
Tabela 5.21 - Datas referentes aos acontecimentos considerados na estimativa do assentamento secundário em Março de 2018	66
Tabela 5.22 - Valores das variáveis respetivas ao tempo, usados na estimativa do assentamento secundário em Março de 2018	67
Tabela 5.23- Cálculo do assentamento que pode vir a ocorrer nas condutas do CAR	67
Tabela 5.24- Significado das colunas a) e b), na representação apresentada na Tabela 5.23	67

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ALFABETO LATINO

α_v - coeficiente de compressibilidade

C_c - índice de compressibilidade

C_r - índice de recompressibilidade

C_s - índice de expansibilidade

C_α - coeficiente de consolidação secundária

c_v - coeficiente de consolidação vertical

d - variação infinitesimal

E - módulo elasticidade

e - índice de vazios

e_0 - índice de vazios inicial

F_m - força da mola no modelo analógico de Terzaghi

H - máximo percurso da água num estrato em consolidação

h - espessura de camada ou de amostra

h_0 - espessura inicial de camada ou de amostra

I_p - índice de plasticidade

k - coeficiente de permeabilidade

M - variável adimensional

m - variável inteira adimensional

m_v - coeficiente de compressibilidade volumétrica

P_d - peso do disco no modelo analógico de Terzaghi

P_o - peso do objeto no modelo analógico de Terzaghi

S - área do disco no modelo analógico de Terzaghi

s - assentamento

s_c - assentamento por consolidação

s_d - assentamento por consolidação secundária

s_i - assentamento imediato

T - fator tempo num processo de consolidação generalizado

t - variável temporal

$t_{\%}$ - valor da variável temporal quando o grau de consolidação médio tem a % indicada

U - fração de peso do objeto suportado pela mola no modelo analógico de Terzaghi

U_z - grau de consolidação pontual num processo de consolidação vertical

u - pressão neutra, pressão na água dos poros ou pressão intersticial

u_e - excesso de pressão neutra

$u_e(0)$ - excesso de pressão neutra inicial

V - volume total de uma amostra ou de um bloco de solo

V_s - volume de partículas sólidas numa amostra de solo

w - teor em água

w_L - limite de liquidez

w_p - limite de plasticidade

w_s - limite de retração

x - variável espacial

y - variável espacial

Z - fator de profundidade

z - variável espacial

ALFABETO GREGO

γ_w - peso volúmico da água

Δ - variação de uma grandeza

Δq_s - sobrecarga aplicada à superfície

Δu - excesso de pressão neutra

ε_v - extensão vertical

ε_{vol} - deformação volumétrica

σ_v - tensão total vertical

σ'_h - tensão efetiva horizontal

σ'_{h0} - tensão efetiva horizontal inicial

σ'_p - tensão de pré-consolidação

σ'_v - tensão efetiva vertical

σ'_{v0} - tensão efetiva vertical inicial

SIGLAS E ACRÓNIMOS

© - Marca Registada

CAR - Circuito de Águas de Refrigeração

CPPE – Companhia Portuguesa de Produção de Eletricidade, S.A.

DN - Diâmetro Nominal

EDP - Energias de Portugal

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Fig. - Figura

MW - Megawatt

NE - Nordeste

NW - Noroeste

PRFV - Plástico reforçado com fibra de vidro

S.A. - Sociedade Anónima

SE - Sudeste

SPT - Standard Penetration Test

SW - Sudoeste

Vol. - Volume

1

INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVOS

Um dos grandes problemas da Engenharia Civil e da Engenharia Geotécnica tem sido, desde sempre, a concentração da maioria das áreas urbanas e industriais em zonas de maciços argilosos, habitualmente zonas geológicas muito recentes que apresentam deformações volumétricas elevadas que se estendem por longos períodos de tempo. Em Portugal encontram-se diversas áreas afetadas por esta mesma instabilidade, nomeadamente os vales aluvionares do litoral.

Após a construção, principalmente de complexos industriais em áreas como a descrita, é fulcral monitorizar o comportamento das diversas estruturas implantadas, sendo os resultados da observação um elemento fundamental para avaliar o seu comportamento e, sempre que tal se justifique, fundamentar as medidas de intervenção.

Na presente dissertação pretendeu-se estudar a evolução dos assentamentos na Central termoeleétrica de Ciclo Combinado de Lares que se encontra a cargo da EDP, aliando a análise dos resultados da monitorização topográfica, efetuada durante 6 anos em toda a área onde ela se localiza, ao enquadramento geológico-geotécnico da zona da obra, que se mostrou essencial uma vez que o maciço que lhe serve de fundação se encontra no vale aluvionar do Baixo Mondego.

Dividiu-se o presente trabalho em duas análises, sendo que na primeira se analisou os dados fornecidos nos relatórios dos levantamentos topográficos realizados na vedação periférica da Central. A vedação encontra-se fundada sobre lintel, diretamente em contacto com o aterro e, portanto, acompanhou todos os desníveis ocorridos desde o fim da construção da obra.

Na segunda análise, estimou-se os assentamentos que poderão vir a ocorrer num dos sistemas de condutas da Central, o Circuito de Águas de Refrigeração, no qual se detetaram várias roturas nos últimos anos e, por isso, procurou-se obter a evolução dos assentamentos até ao fim da vida útil da obra no intuito de solucionar este problema.

Para conseguir obter os assentamentos ao longo dos anos, foi necessário analisar as equações encontradas bibliograficamente no que respeita ao tipo de solo encontrado, nomeadamente aos solos moles, e ao tipo de carregamento em questão, para permitir de seguida, apresentar valores através de vias numéricas.

Ambas as análises realizadas permitiram perceber a diferença de grandeza entre assentamentos medidos em zonas distintas do terreno, demonstrando as propriedades peculiares apresentadas no tipo de solo encontrado em depósitos aluvionares.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação encontra-se dividida de modo a, inicialmente, apresentar a base teórica e o enquadramento da Central de Lares, que foram posteriormente utilizados nos métodos numéricos necessários para alcançar o objetivo dos trabalhos.

No Capítulo 2 apresentam-se os fundamentos teóricos em que se baseia o estudo do comportamento dos solos moles em situações de carregamento confinado, e é abordado o processo de consolidação típico destes solos.

No caso do Capítulo 3 apresenta-se o caso de estudo da dissertação, especificando em que consiste a obra da Central de Ciclo Combinado de Lares, a sua localização e os detalhes a que foi possível aceder, necessários às estimativas realizadas nos capítulos seguintes. Igualmente no presente capítulo expõe-se o caso de estudo referente à Quinta da Foja, também localizada no depósito aluvionar do Baixo Mondego, para ajudar na perceção das propriedades deste tipo de solo.

No Capítulo 4 analisou-se os desníveis ocorridos na vedação periférica da Central de Lares, provenientes dos relatórios das campanhas de levantamentos topográficos realizadas nos últimos anos.

O Capítulo 5 expõe os problemas ocorridos na Central, nomeadamente as roturas no Circuito de Águas de Refrigeração, os dados adquiridos nos levantamentos topográficos para esta área e os resultados das estimativas do assentamento a ocorrer no CAR, assim como a respetiva análise.

As conclusões do estudo elaborado são apresentadas no Capítulo 6, enquanto de seguida são apresentadas as referências bibliográficas que serviram de base ao presente trabalho.

2

Compressibilidade e Consolidação dos Solos Moles

2.1. CARACTERIZAÇÃO DE UM SOLO MOLE

No presente capítulo expõe-se o comportamento adotado pelos solos moles quando sujeitos a carregamento, sendo importante inicialmente realizar uma breve caracterização deste tipo de solos.

Os solos moles são constituídos, principalmente, por partículas muito finas (tamanho da ordem de um milésimo de milímetro) que, mineralogicamente, correspondem na sua maioria a argilas e são, por isso, designados por solos argilosos ou apenas por argilas.

Estas partículas apresentam uma forma laminar, que lhes confere uma superfície específica elevada. Devido às suas características geométricas, a maioria das moléculas que as constituem encontram-se junto a essa superfície.

Por outro lado, devido à sua natureza e ao arranjo dos átomos nas moléculas, há predominio de cargas elétricas negativas à superfície. Esta predominância, conduz à propensão para as partículas de argila atraírem cátions de sais dissolvidos na água assim como moléculas de água, até ficarem eletricamente neutralizadas.

Para além das forças de natureza elétrica, existem as forças denominadas de Van der Waals, que se desenvolvem entre as moléculas de uma partícula e entre moléculas de partículas vizinhas, assim como as forças gravíticas.

No interior de um solo argiloso, as partículas adotam uma posição relativa que resulta do equilíbrio entre as forças de superfície e as forças gravíticas, sendo que estas últimas, geralmente, se apresentam inferiores.

A atividade química das argilas manifesta-se através das forças de superfície, ou seja, quanto maior a superfície específica maior se apresenta essa atividade e, uma vez que as partículas de argila têm uma superfície específica elevada, elas são quimicamente muito ativas.

Posto isto, é fácil perceber o comportamento de um solo argiloso cuja sedimentação é recente e em contacto direto com água livre (por exemplo em lagos, rios ou no fundo do oceano), assumindo um teor em água elevado (w) e consistência bastante reduzida. Quando este é carregado, como no caso de estratos argilosos antigos e em maior profundidade, o teor em água e o índice de vazios (e) reduzem-se e é adquirida alguma consistência, que ocorre devido ao processo chamado de *consolidação* explicado em pormenor de seguida.

A quantidade de água no contorno de cada partícula no interior de um solo argiloso tem, assim, um papel essencial no arranjo e distância entre as partículas, sendo que este teor em água influencia o índice de vazios de um solo fino saturado e representa neste tipo de solo o parâmetro físico essencial (Casagrande, 1948 citado por Matos Fernandes, 2012).

Considerando a importância do teor em água nas argilas, nomeadamente, na antecipação do seu comportamento mecânico, realça-se a existência dos *limites de Atterberg*, que limitam os diferentes estados de solo e respetivo comportamento em função da quantidade de água.

Segundo os termos adotados por Folque (1997) os estados dividem-se nos quatro seguintes: *líquido*, *moldável*, *friável* e *volume constante*, respetivamente com w decrescente. São então três os limites, nomeadamente o *limite de liquidez* (w_L), o *limite de plasticidade* (w_P) e o *limite de retração* (w_S), sendo que a diferença entre os dois mais utilizados representa o *índice de plasticidade* (I_P).

$$I_P = w_L - w_P \quad (2.1)$$

No que diz respeito ao limite de liquidez e de plasticidade, logo ao índice de plasticidade, estes são condicionados tanto pela percentagem de fração argilosa como pela respetiva atividade química dos minerais, crescendo com ambas e, logo, aumentando nas argilas gordas, solos chamados de muito plásticos.

Quanto às conclusões relativamente à idade dos solos argilosos, pode dizer-se que nos solos mais recentes o teor em água apresentado é muito próximo do limite de liquidez e nos solos mais antigos, carregados por novos sedimentos, o teor em água se aproxima do limite de plasticidade (Matos Fernandes, 2012).

2.2. CARREGAMENTO SOB CONFINAMENTO LATERAL

2.2.1. ESTRATO CONFINADO

A consolidação de um solo é o nome dado ao processo a que estão sujeitos os solos argilosos recentes, ao sofrerem carregamentos. Nestes solos, o teor em água e o índice de vazios são elevados e, conseqüentemente, também a compressibilidade e encontram-se, por exemplo, em vales aluvionares no litoral português.

Este processo consiste na reorganização do esqueleto sólido do solo, acarretando a expulsão de água dos poros e diminuição de vazios, que é acompanhada de um aumento da tensão efetiva e diminuição de volume.

Considerando que solos deste tipo são pouco permeáveis, a consolidação ocorre muito lentamente, levando a gerar-se assentamentos, por vezes, durante vários anos. Torna-se difícil a construção nestes locais e mostra-se essencial prever a evolução deste processo até estabilizar, assim como implementar medidas com vista a acelerar essa evolução.

O modo como a consolidação se dá depende de vários fatores, nomeadamente das condições em que o carregamento é realizado, sendo mais comum encontrar solos carregados sob confinamento lateral. Neste tipo de carregamento o maciço é sujeito a uma sobrecarga uniformemente distribuída, na qual a área carregada possui dimensões em planta muito superiores à espessura do conjunto de estratos

compressíveis, como sucede no carregamento natural de um depósito sedimentar, ao receber as novas camadas de sedimentos.

Estratos nestas condições são designados de estratos confinados e apresenta-se na Figura 2.1 um exemplo, na qual Δq_s representa a sobrecarga aplicada à superfície.

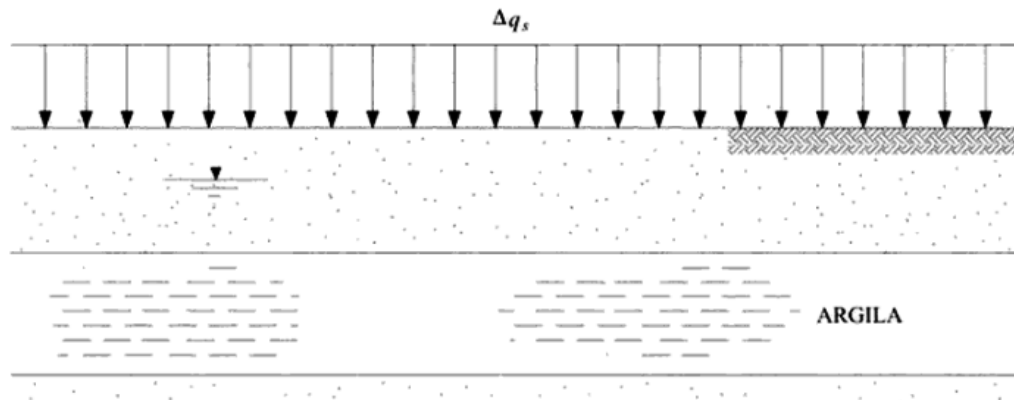


Figura 2.1 - Condições de carregamento de um estrato confinado de argila (Matos Fernandes, 2012).

No carregamento em condições de confinamento lateral as deformações na direção horizontal são nulas, enquanto os deslocamentos verticais são menores na camada de solo mais profunda, em contato com o substrato, e máximos perto da superfície do maciço. Isto conduz à redução da espessura de cada estrato, em especial do estrato de argila que é habitualmente o mais compressível.

2.2.2. ENSAIO EDMÉTRICO E ANALOGIA DE TERZAGHI

O ensaio laboratorial que permite simular o carregamento nas condições anteriormente referidas, com vista a obter o comportamento do solo, é o ensaio edométrico, apresentado na Figura 2.2. Na sua realização é possível adotar as condições de carregamento, de deformação e de drenagem, tal como as encontradas em campo nos estratos confinados.

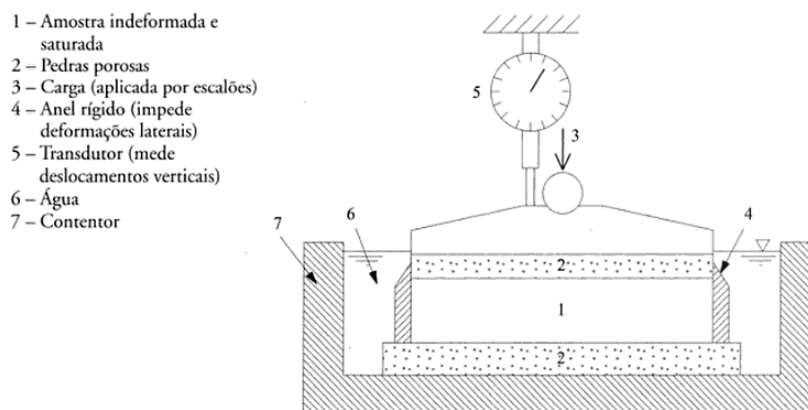


Figura 2.2 - Representação simplificada do ensaio edométrico (Matos Fernandes, 2012)

O ensaio edométrico consiste no carregamento de uma amostra, indeformada e saturada, colocando-a entre duas pedras porosas que permitem realizar a drenagem verticalmente. O carregamento é realizado em vários patamares de carga, aplicados de forma constante até o solo estabilizar, sem que haja quaisquer deformações laterais.

Os patamares são realizados em intervalos mínimos de 24 horas, para ser possível dissipar o excesso de pressão neutra ocorrido devido a cada carregamento e, conseqüente, ocorrerem as deformações volumétricas na amostra. Geralmente, este ensaio é efetuado recorrendo a ciclos de descarga-recarga para simular as condições em que se encontram os solos sobreconsolidados, que vão ser caracterizados mais à frente durante este capítulo.

Através deste ensaio é possível obter as curvas de compressibilidade de uma argila, nas quais é relacionado o índice de vazios e a tensão efetiva vertical, e, posteriormente caracterizar os assentamentos desse solo. Para poder explicar o processo ocorrido após o carregamento de um estrato de argila sob condições de confinamento lateral e, nomeadamente, o processo levado a cabo nos ensaios edométricos, é apresentado de seguida o modelo analógico proposto por Terzaghi (1943).

Neste modelo, representado na figura 2.3, recorrendo a um reservatório de paredes rígidas e a um êmbolo com formato de disco ligado à base por uma mola, provido de um orifício muito fino, é possível simular o que ocorre quando um estrato confinado de argila é carregado bruscamente. Inserindo água em todo o reservatório e colocando um objeto, muito rapidamente, sobre o disco (de peso P_d), simula-se o carregamento.

Durante este processo pode observar-se, num estado inicial, que o peso do objeto (P_o) é suportado pela água envolvente, desenvolvendo um excesso de pressão ($u_e(0)$), que conduz à libertação de água pelo orifício.

Num instante posterior, acompanhando a expulsão de água e respetiva diminuição do excesso de pressão da água, há um aumento da força transmitida à mola (de fração igual a U) e à água. O processo é finalizado no instante em que toda esta força é dirigida à mola e a pressão da água regressa ao normal, atingindo-se novamente a situação inicial de equilíbrio.

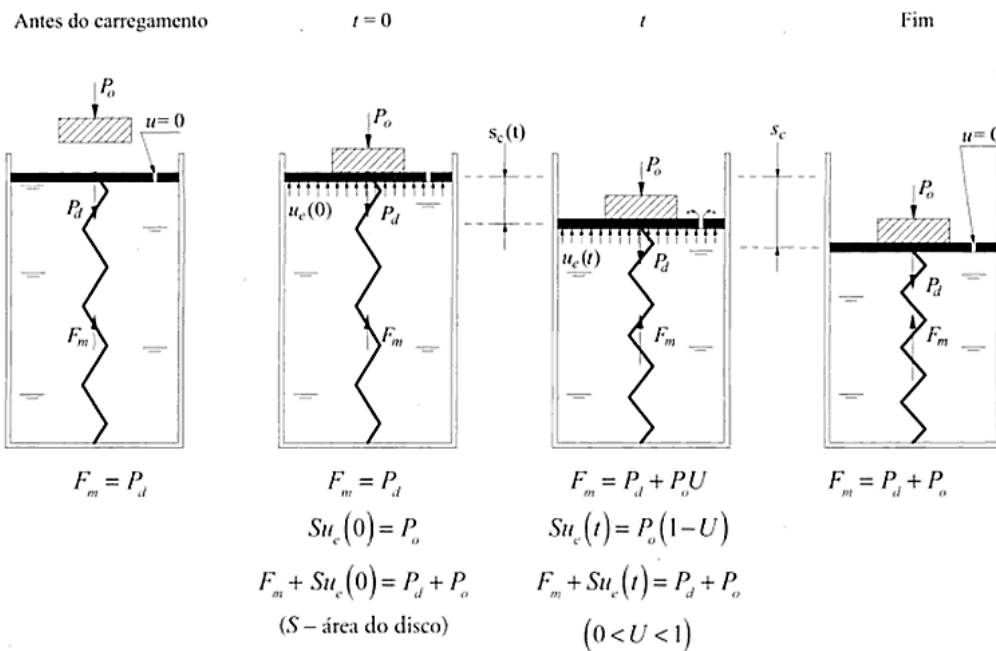


Figura 2.3 - Modelo analógico proposto por Terzaghi para o carregamento e consolidação de estratos confinados de argila (Matos Fernandes, 2012)

Tabela 2.1 - Correspondência entre o modelo de Terzaghi e o carregamento de um estrato confinado (Matos Fernandes, 2012)

Modelo de Terzaghi	Carregamento de um estrato confinado
Mola	Esqueleto sólido do solo
Água	Água dos poros do solo
Disco	Estratos sobrejacentes ao estrato de argila
Objeto	Obra construída à superfície do terreno
Dimensões do orifício	Permeabilidade da argila
Força na mola, F_m	Tensão efetiva
Pressão da água, u	Pressão nos poros (pressão neutra)
Excesso de pressão na água, u_e	Excesso de pressão neutra
Peso do disco, P_d	Tensão efetiva de repouso
Peso do objeto, P_o	Sobrecarga aplicada à superfície
Altura que o disco desceu, $s_c(t)$	Assentamento por consolidação no instante t
Altura que o disco desceu no final, s_c	Assentamento por consolidação (final)

Através da analogia de Terzaghi, e das respetivas correspondências apresentadas no quadro 4.1, foi possível chegar a algumas conclusões no que diz respeito ao carregamento de estratos de argila confinados em casos reais. Nomeadamente, permitiu caracterizar as evoluções da tensão vertical total

(σ_v), da tensão efetiva vertical (σ'_v) e da pressão neutra (u) num ponto genérico do estrato, como é apresentado na figura 2.4.

É então viável descrever, de um modo geral, todo o processo ocorrido posteriormente ao carregamento do solo. No instante inicial do carregamento ($t = 0$) dá-se um assentamento imediato concordante com a deformação volumétrica das camadas mais permeáveis (estratos granulares onde a água é expulsa facilmente dos poros). Uma vez que a permeabilidade da argila é bastante inferior esta não apresenta, neste instante, qualquer deformação volumétrica e é desencadeado um aumento de pressão na água dos seus poros, igual ao incremento de tensão vertical, designado de *excesso de pressão neutra* (u_e).

Nos instantes seguintes, a expulsão de água da camada de argila em direção à (/s) fronteira (/s) drenante (/s) é iniciada, sendo acompanhada de uma progressiva deformação volumétrica. Esta deformação apresenta um consequente aumento de tensão efetiva e diminuição da pressão neutra, desenvolvendo um assentamento da superfície do terreno que se desenvolve a uma taxa que se vai reduzindo ao longo do tempo, uma vez que, quando o excesso de pressão neutra se aproxima de valores nulos, também o gradiente hidráulico gerado nas fronteiras do estrato de argila e a velocidade de percolação da água se anulam.

Neste processo de dissipação do excesso de pressão neutra, associado ao processo de consolidação, como foi já referido anteriormente, é transferido o aumento de tensão total, resultante do carregamento, da fase líquida para a fase sólida do solo (esqueleto sólido) (Matos Fernandes, 2012).

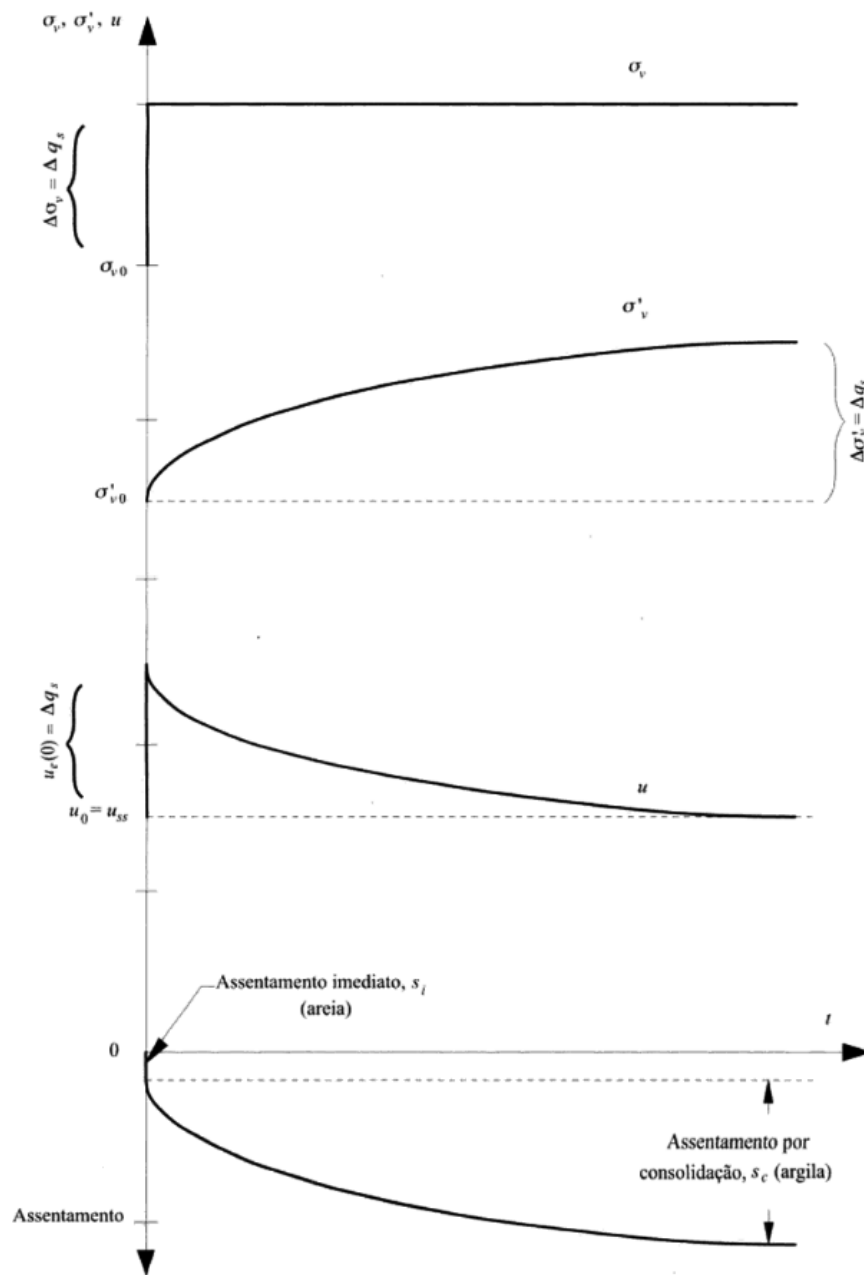


Figura 2.4 - Evolução no tempo do estado de tensão num ponto genérico do estrato de argila e do assentamento dado na superfície do terreno (Matos Fernandes, 2012)

Voltando à questão dos resultados obtidos com os ensaios edométricos, como foi dito anteriormente, é possível obter diagramas de compressibilidade do solo que expressam, preferencialmente em escala logarítmica como apresentado na figura 2.5, a relação entre a tensão efetiva vertical imposta com o índice de vazios apresentado 24 horas depois de ser aplicada a carga, sucessivamente para as diferentes cargas aplicadas durante o ensaio.

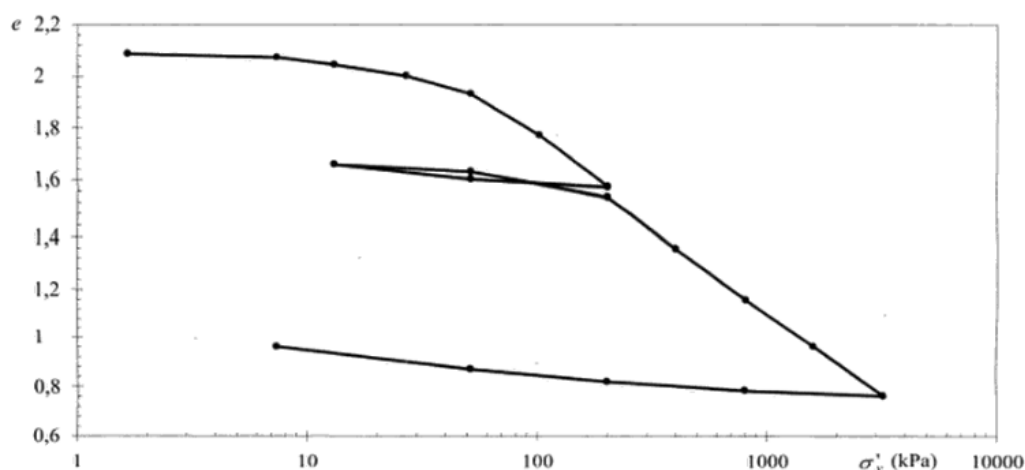


Figura 2.5 - Diagrama da relação entre a tensão efetiva vertical (em escala logarítmica) e o índice de vazios, obtido através de um ensaio realizado numa amostra de argila do Baixo Mondego (Coelho, 2000)

Para além dos parâmetros de compressibilidade do solo suscetíveis de obter através destes diagramas, que vão ser apresentados no subcapítulo seguinte, é igualmente possível constatar alguns aspetos dos solos sujeitos a carregamento em condições de confinamento lateral. Verifica-se que o comportamento mecânico do solo é não-linear, ou seja, não há proporcionalidade na relação entre a tensão aplicada e a variação do índice de vazios, e que uma parte da deformação é irreversível quando ocorre uma descarga do solo, consequência do aumento da compacidade ocorrer devido à reorganização do esqueleto sólido do solo (Matos Fernandes, 2012).

2.3. ESTIMATIVA DO ASSENTAMENTO POR CONSOLIDAÇÃO

Estimar o assentamento por consolidação passa por, inicialmente, retirar os valores dos parâmetros de compressibilidade dos diagramas obtidos através dos ensaios edométricos.

Através de comparações realizadas por Schmertmann (1955), entre diagramas de tensão efetiva vertical *versus* índice de vazios obtidos através de ensaios edométricos, e a presumível curva do maciço *in situ*, foi possível verificar que nas curvas laboratoriais os valores se apresentam inferiores à situação real. Neste mesmo estudo, foi possível observar que com o prosseguimento do carregamento estas curvas se aproximam e convergem num valor do índice de vazios próximo a 0,42 vezes o índice de vazios do solo no seu estado natural.

Mostra-se, deste modo, necessário fazer um prévio tratamento às curvas obtidas laboratorialmente, através da construção empírica proposta por Schmertmann. Considerando que este assunto não se mostra significativo neste trabalho, não se prolonga a sua discussão na dissertação.

2.3.1. PARÂMETROS QUE DEFINEM AS RELAÇÕES TENSÕES-DEFORMAÇÕES

Como se pode observar na figura 2.6, representativa de um diagrama de escala semi-logarítmica de tensões verticais efetivas *versus* índice de vazios da amostra, após a realização do ajuste, é possível retirar diferentes índices através dos declives, apresentados pelos ramos representativos das diferentes cargas aplicadas no ensaio.

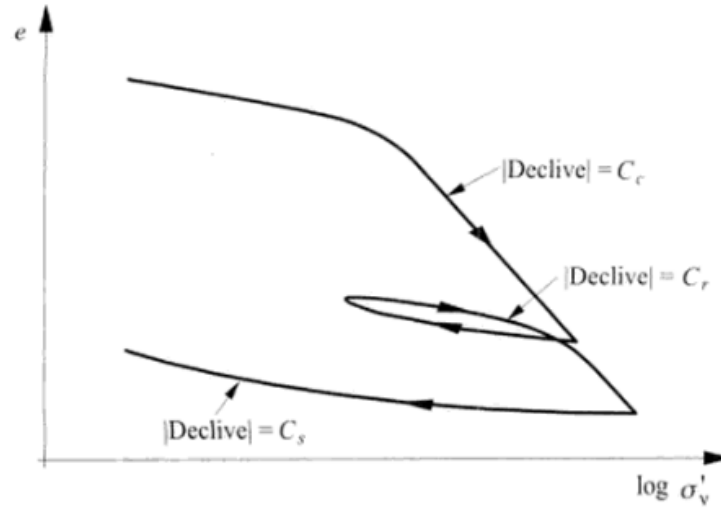


Figura 2.6 - Diagrama $\log \sigma'_v - e$ (Matos Fernandes, 2012)

O *índice de compressibilidade* (C_c) do solo é dado pelo declive (em módulo) do ramo virgem da curva de compressibilidade, o *índice de recompressibilidade* (C_r) corresponde ao declive (em módulo) do ramo de recompressão obtido num ciclo de descarga- recarga e o *índice de expansibilidade* (C_s), que é usado no estudo da resposta de maciços à diminuição da tensão efetiva vertical, e é estimado através do ramo de descarga final, depois de ser atingido o escalão máximo de carga. Os valores de C_r e C_s oscilam normalmente entre 1/5 e 1/10 do valor de C_c .

É também possível obter outros coeficientes, através das curvas edométricas, que variam com o valor da tensão efetiva. O *coeficiente de compressibilidade* (a_v), através do valor, em módulo, da resultante da razão entre a variação do índice de vazios e a tensão efetiva (em escala algorítmica) e o *coeficiente de compressibilidade volumétrica* (m_v) com a mesma curva, mas em termos de deformação volumétrica, com as fórmulas apresentadas de seguida:

$$a_v = \left| \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \right| \quad (2.2)$$

$$m_v = \frac{\varepsilon_{vol}}{\Delta \sigma'_v} = \frac{1}{1 + e_0} a_v \quad (2.3)$$

com e_0 igual ao índice de vazios inicial da amostra e Δe variação do índice de vazios.

Na última fórmula apresentada é possível realizar a associação demonstrada (resultante do relacionamento dos coeficientes apresentados) uma vez que no caso estudado estamos presente um estrato confinado e, por isso, $\varepsilon_{vol} = \varepsilon_v = \Delta h/h_0$ (Matos Fernandes, 2012).

2.3.2. CÁLCULO DO ASSENTAMENTO POR CONSOLIDAÇÃO

Para proceder à apresentação da expressão usada no cálculo dos assentamentos por consolidação, considera-se a figura 2.7 referente a um caso geral de carregamento de um solo sobreconsolidado, solo no qual a tensão efetiva vertical de repouso (σ'_{v0}) é inferior à máxima tensão efetiva já experimentada pelo solo (*tensão de pré-consolidação* de símbolo σ'_p).

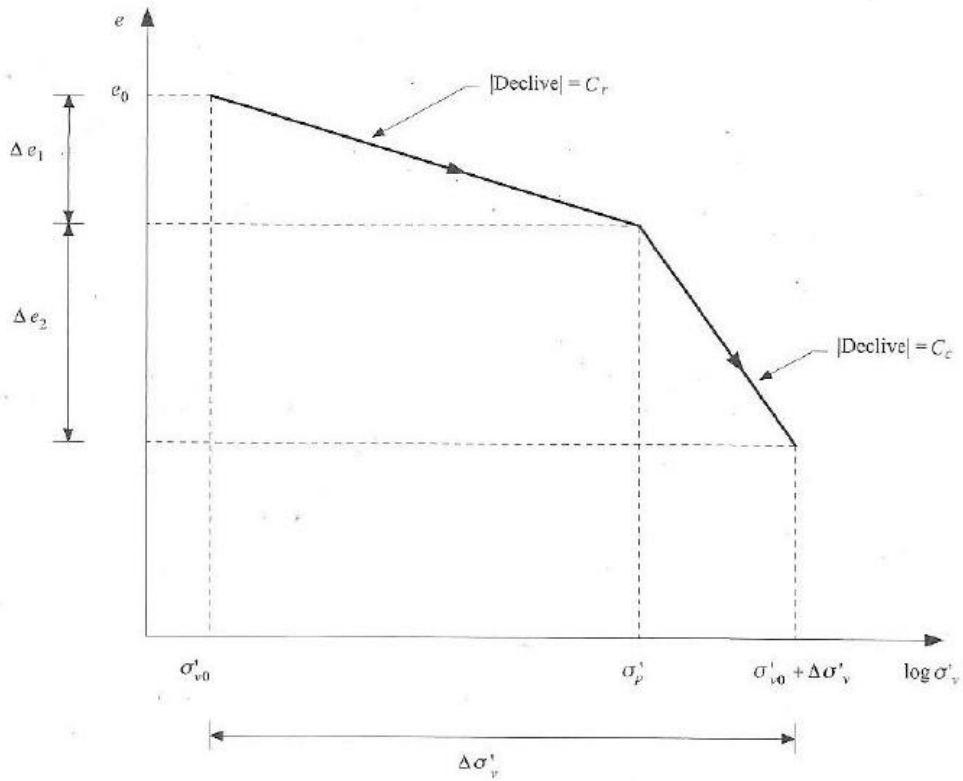


Figura 2.7 - Carregamento de uma argila sobreconsolidada em que o incremento de tensão é superior à tensão de pré-consolidação (Matos Fernandes, 2012)

Considerando que neste caso a soma do incremento de tensão efetiva vertical ($\Delta \sigma'_v$) com a tensão efetiva de repouso é superior à tensão de pré-consolidação, o solo experimenta uma recompressão e uma compressão em ramo virgem, que conduzem a duas diferentes variações do índice de vazios e, consequentemente, duas diferentes variações de espessura.

Nestas condições, surge a fórmula 2.4 para o assentamento por consolidação num solo sobreconsolidado, resultante da soma das variações de espessura:

$$s_c = \frac{h_0}{1 + e_0} \left(C_r \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} + C_c \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta \sigma'_v}{\sigma'_p} \right) \quad (2.4)$$

com h_0 igual à espessura inicial do estrato.

2.4. TEORIA DA CONSOLIDAÇÃO DE TERZAGHI

A teoria formulada por Terzaghi (1923 a, b) tem como objetivo caracterizar o tempo que a consolidação leva a ser processada assim como determinar os assentamentos devido a este processo. Passando a citar o autor referido, apresentam-se de seguida os pressupostos sobre os quais a sua teoria é baseada:

- O solo é homogéneo e está saturado;
- A compressibilidade da água e das partículas individuais do solo é desprezável;
- Em qualquer secção horizontal e em qualquer instante os estados de tensão e de deformação são uniformes;
- As deformações ocorrem apenas na direção vertical;
- O escoamento da água é exclusivamente vertical e obedece à lei de Darcy;
- Os efeitos, os fenómenos e o seu curso em elementos de dimensões infinitesimais são extrapoláveis para dimensões representativas de uma maciço real;
- Para um pequeno intervalo de tensões e de deformações considera-se constante o coeficiente de permeabilidade, k , e os coeficientes de compressibilidade, a_v , e de compressibilidade volumétrica, m_v ;
- Existe uma relação biunívoca entre o índice de vazios e a tensão efetiva vertical, num dado ponto e num dado instante (inexistência de fluência do esqueleto sólido);
- É válida a hipótese dos pequenos deslocamentos (linearidade geométrica).

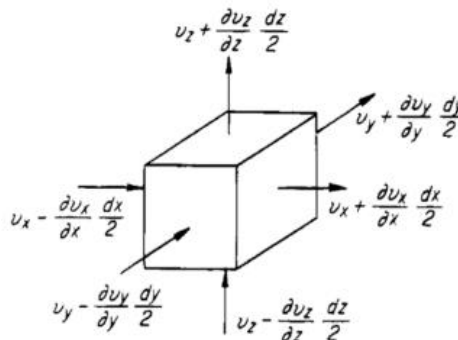


Figura 2.8 - Componentes da velocidade de descarga nas faces de um elemento genérico de solo (Terzaghi et al., 1996)

No carregamento de um estrato de argila confinado e admitindo a origem do sistema de eixos na sua fronteira superior, centra-se particularmente num elemento genérico desse estrato, com volume $V = dx \, dy \, dz$. Considerando que a variação de volume de água na unidade de tempo consiste na diferença entre o caudal que entra e o que sai, resulta na seguinte equação de continuidade:

$$\frac{\partial e}{\partial t} \frac{V_s}{V} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (2.5)$$

com V_s igual ao volume de partículas sólidas, k coeficiente de permeabilidade e z cota geométrica que mede a distância desde a fronteira superior do estrato de argila.

Atendendo ao facto de que o escoamento apenas é exequível na direção vertical e que durante a consolidação do solo a tensão vertical total é constante, e igual à soma da tensão efetiva vertical com a pressão neutra da água, recorrendo à fórmula do coeficiente de compressibilidade numérica (m_v) apresentada em 2.3, é possível reescrever a equação da continuidade da seguinte forma:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (2.6)$$

Devido ao coeficiente de consolidação, c_v , de equação igual à primeira parcela da equação 2.8 e que se exprime em m²/s ou m²/ano, é exequível escrever a seguinte equação de consolidação de Terzaghi:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

Integrando a equação 2.9 obtém-se a evolução da dissipação do excesso de pressão neutra, ou seja a evolução do processo de consolidação, no espaço e no tempo. Para auxiliar a obtenção de soluções desta equação, trabalha-se com grandezas adimensionais diretamente proporcionais a z e t (representativas do espaço e tempo real, respetivamente) cujas expressões se apresentam de seguida:

$$Z = \frac{z}{H} \quad (2.8)$$

$$T = \frac{c_v t}{H^2} \quad (2.9)$$

nas quais Z representa o *fator de profundidade*, T o *fator tempo* e H a maior distância percorrida por uma partícula de água até abandonar o estrato em consolidação, na direção de uma fronteira drenante.

Esta integração é aplicável quando este excesso é constante em toda a espessura do estrato e depende das condições encontradas no maciço carregado, nomeadamente a existência de uma (representando H toda a espessura do estrato de argila) ou duas fronteiras drenantes (em que H representa metade da altura do estrato de argila).

$$u_e = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_e(0)}{M} (\text{sen} MZ) e^{-M^2 T} \quad (2.10)$$

Com:

$$M = \frac{\pi}{2} (2m+1) \quad (2.11)$$

na qual m é uma variável que pode tomar valores de 0,1,2,3...

Esta integração pode ser representada graficamente, usando a distribuição do excesso de pressão neutra no eixo das abcissas superior, ou aplicando o chamado de grau de consolidação ($U_z(t)$) no eixo das abcissas inferior, e a variável Z no eixo das ordenadas, como representado na figura 2.9.

O grau de consolidação, fisicamente, representa a razão entre o incremento de tensão efetiva vertical já instalado e o incremento correspondente ao fim do processo de consolidação, isto em cada ponto e instante, e é representado pelas seguintes equações (Matos Fernandes, 2012):

$$U_z(t) = 1 - \frac{u_e(t)}{u_e(0)} \quad (2.12)$$

ou

$$U_z(t) = \frac{\Delta\sigma'_v(t)}{\Delta\sigma'(final)} \quad (2.13)$$

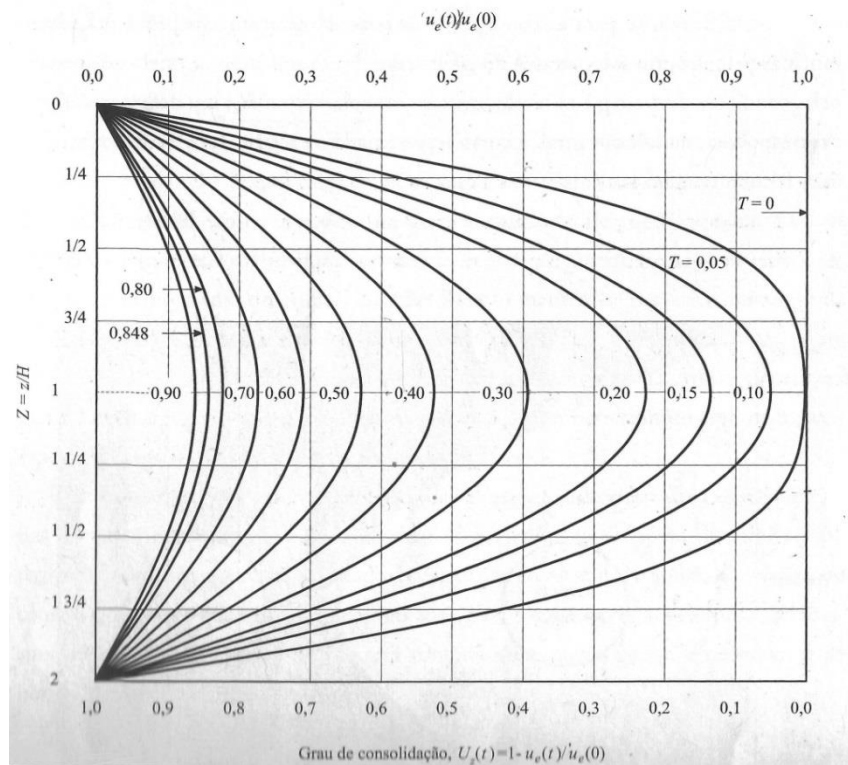


Figura 2.9 - Solução da equação de consolidação de Terzaghi no caso de dupla fronteira drenante e excesso de pressão neutra inicial constante em toda a espessura do estrato (Matos Fernandes, 2012).

2.5. CONSOLIDAÇÃO SECUNDÁRIA

Findo o processo de transferência da tensão aplicada da água dos poros para a estrutura sólida do solo (consolidação primária), apura-se que ainda ocorrem algumas deformações volumétricas na argila, que

podem ser explicadas pela fluência do esqueleto sólido e das camadas de água absorvida, nas quais se verificam reajustamentos durante um elevado período de tempo.

Este processo, ao qual se dá o nome de consolidação secundária ou consolidação secular, acontece sob tensão efetiva constante e, uma vez que só pode ocorrer devido à expulsão de água do solo, terão de estar presentes condições que conduzam a excessos de pressão neutra e gradientes hidráulicos muito reduzidos, que corresponderão a um fluxo de velocidade também muito reduzido, que não é regido pela lei de Darcy. Para não induzir em erro, passa agora a designar-se a consolidação caracterizada no subcapítulo anterior de consolidação primária.

O assentamento por consolidação secundária, s_d , apresenta a seguinte fórmula:

$$s_d = \frac{h}{1+e} C_\alpha \log \frac{t_2}{t_1} \quad (2.14)$$

na qual C_α consiste no *coeficiente de consolidação secundária*, h representa a espessura da camada de argila, t_2 o instante em que se pretende saber o assentamento ocorrido e t_1 o instante no qual termina a consolidação primária (que pode ser substituído por t_{90} , correspondente ao grau de consolidação médio de 90%).

A consolidação secundária é significativa em depósitos recentes de solos argilosos com muita plasticidade e (ou) alta quantidade de matéria orgânica, como é o caso das aluviões orgânicas presentes no litoral português, e desprezável nos depósitos sobreconsolidados (Matos Fernandes, 2012).

Em resumo, o assentamento total experimentado por um solo argiloso quando recebe um carregamento vertical é o resultado da soma do assentamento imediato, do assentamento por consolidação primária e do consequente da consolidação secundária. Dependendo da natureza do solo presente nas camadas deformáveis do maciço em estudo, a importância de cada uma destas parcelas tem mais ou menos predominância.

É apresentada de seguida uma representação gráfica da curva genérica da distribuição temporal dos assentamentos ocorridos numa fundação, válida para todos os maciços, tendo em consideração a possível variação da ordem de grandeza das escalas, do tempo e das três componentes do assentamento, adaptada de Perloff (1975) (Matos Fernandes, 2011).

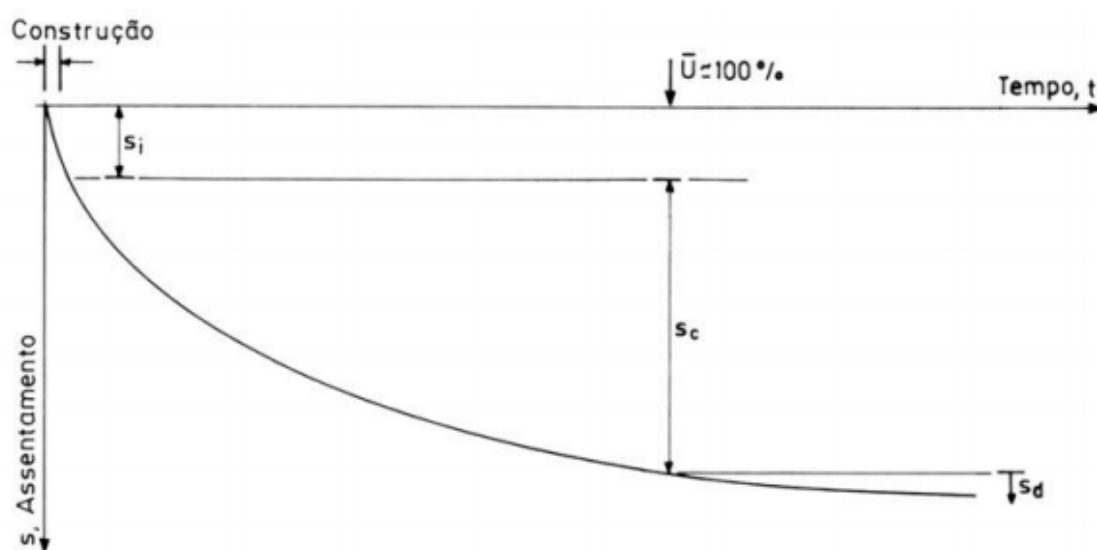


Figura 2.10 - Curva genérica tempo-assentamento de uma fundação (Perloff, 1975 em Matos Fernandes, 2011)

3 CASO DE ESTUDO

3.1. DESCRIÇÃO DA CENTRAL DE CICLO COMBINADO DE LARES

A Central de Ciclo Combinado de Lares consiste numa central de produção de energia elétrica e representa umas das duas centrais de ciclo combinado existentes em Portugal, ambas exploradas pela Energias de Portugal (EDP).

A construção da Central termoelétrica foi iniciada em Junho de 2007, sendo que esta é constituída por dois grupos de produção, que entraram em funcionamento no ano de 2010.



Figura 3.1 - Fotografia aérea da Central termoelétrica de Lares (EDP, 2015)

Os dois grupos de ciclo combinado independentes apresentam, em conjunto, uma potência instalada de cerca de 800 MW de energia elétrica e o combustível usado no seu funcionamento é o gás natural.

Este combustível é proveniente de uma armazenagem subterrânea existente no Carriço e é, posteriormente, combinado com ar comprimido e queimado, em cada grupo. Os gases resultantes deste processo são transportados para uma caldeira de recuperação para produzir vapor de água.

O vapor de água ativa uma turbina, que por sua vez aciona um gerador, produzindo deste modo energia elétrica.

A par do núcleo principal de atividade da Central, existem outros sistemas auxiliares necessários ao seu funcionamento, destacando-se os quatro seguintes (Coelho e Ferreira, 2016):

- Sistema de refrigeração;
- Sistema de exaustão de gases;
- Instalação de captação, armazenagem, tratamento e distribuição de água;
- Sistema de drenagem e tratamento de fluentes líquidos.

3.2. LOCALIZAÇÃO DA CENTRAL

A central de Lares localiza-se na margem direita do rio Mondego, na freguesia de Vila Verde do concelho de Figueira da Foz, a 6km Este desta cidade, na povoação que lhe deu o nome.

A obra foi instalada num terreno, com cerca de 10 hectares, que pertence à EDP e onde entre 1966 e 1985 funcionou uma fábrica de carboneto de cálcio.

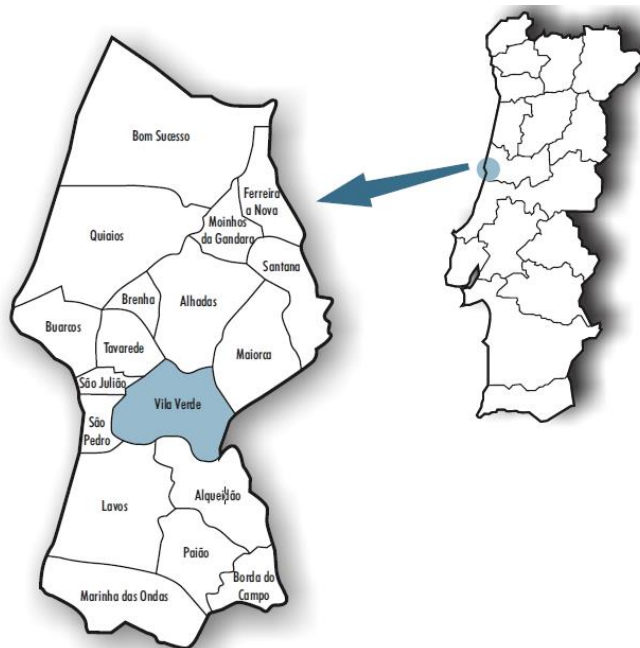


Figura 3.2 - Localização da freguesia de Vila Verde, no concelho de Figueira da Foz (Coelho e Ferreira, 2016)



Figura 3.3 - Mapa da localização geográfica da Central de Lares (Imagens ©2017 Google)

3.3. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

Realizar a caracterização do solo presente em toda a zona abrangida pela Central de Lares afigura-se fundamental para o trabalho presente, uma vez que através de Teorias da Mecânica dos Solos é possível explicar o comportamento mecânico do solo, ou seja, o modo como o solo responde, em termos de deformação, à alteração do seu estado de tensão inicial.

A importância da história geológica do solo, prende-se com o facto de a resposta do solo às novas estruturas depender do histórico de tensões do solo que, segundo Matos Fernandes (2012) representa o “modo como cada solo foi no passado solicitado mecanicamente (carregado) pela Natureza”.

A caracterização Geológica apresentada foi baseada nos trabalhos realizados, previamente à construção da central, nomeadamente a prospeção geológica-geotécnica, por adjudicação da CPPE – Companhia Portuguesa de Produção de Eletricidade, S.A., realizada pela *Geotecnia* da MOTA-ENGIL Engenharia e Construção, S.A.. Durante esses trabalhos foram consultados elementos existentes referentes à região, e realizados diversos ensaios tais como poços de prospeção, SPT, sondagens mecânicas, entre outros necessários à devida caracterização do solo.

A área em Estudo é mostrada na folha “19-C FIGUEIRA DA FOZ” dos Serviços Geológicos de Portugal, apresentado o extrato à escala 1:50 000 e a sua legenda, nas figura 3.4 e figura 3.5, respetivamente.



Figura 3.4 - Extrato da folha 19-C FIGUEIRA DA FOZ da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000 (Serviços Geológicos de Portugal)

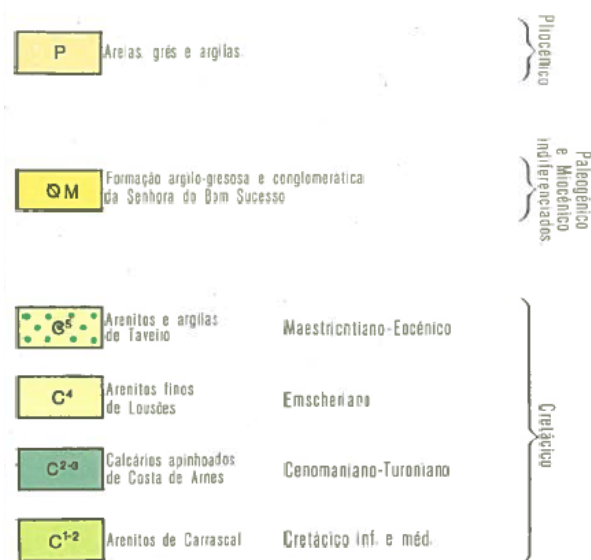


Figura 3.5 - Extrato da legenda da folha 19-C FIGUEIRA DA FOZ da Carta Geológica de Portugal (Serviços Geológicos de Portugal)

A zona estudada situa-se na junção da planície aluvial do rio Mondego com a encosta Sul da Serra da Boa Viagem. Esta serra constitui uma estrutura monoclinal, onde as camadas calcárias do Jurássico e do Cretácico pendem geralmente para Sul, mergulhando sob a planície aluvial do Rio Mondego.

3.3.1. TECTÓNICA

No que diz respeito à tectónica, a zona enquadra-se no alinhamento anticlinal constituído pela Serra da Boa Viagem e de Verride, com direção NW-SE. O anticlinal Buarcos-Verride é uma estrutura geológica complexa, com disposição em arco e falhada no flanco NE, com abatimento do bordo NE e levantamento do flanco SW.

A zona NW desta estrutura é constituída pela estrutura monoclinal da Serra da Boa Viagem. Esta serra está limitada a norte por uma escarpa de falha designada por falha de Quiaios, falha que se encontra ativa, segundo a carta Neotectónica de Portugal (1988), de extrato apresentado na Figura 3.6, dos Serviços Geológicos de Portugal.

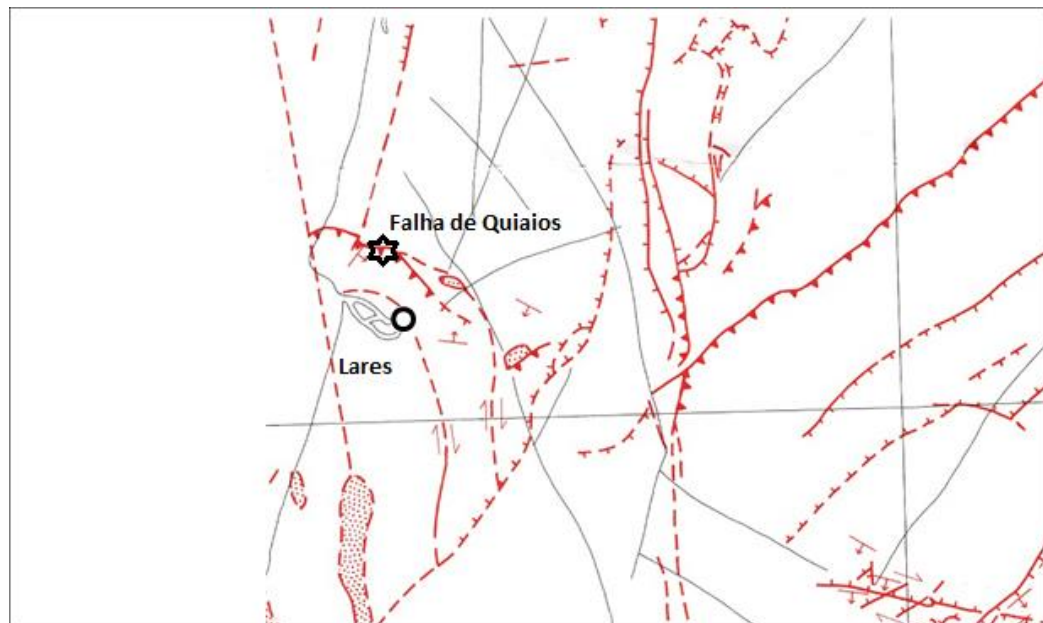


Figura 3.6 - Extrato da Carta Neotectónica de Portugal 1:1 000 000

3.3.2. LITOESTRATIGRAFIA

Quanto à litoestratigrafia encontrada no terreno, a Norte da antiga fábrica observaram-se calcários apinhoados e calcários areníticos, dispostos em camadas que inclinam (10-20°) para S-SW, com algumas aberturas e cavidades cársicas preenchidas por “terra-rossa”.

Na área antigamente ocupada pela fábrica, foram encontrados terrenos aluvionares cobertos por aterros e resíduos de escórias de exploração, assim como outros materiais, apresentados de seguida pela ordem em que foram encontrados:

- Aterros - aterro areno-cascalhento, com cerca de 2 a 4 metros de espessura medianamente compacto a solto. É de notar a existência de um poço junto ao limite Norte da antiga fábrica de aterro composto por pedras e fragmentos de calcário e alguma argila;
- Aluviões - constituídas por areias de granulometria extensa e por lodos mais ou menos arenosos que se encontram geralmente saturados. Existem também solos de transição entre as areias e os lodos, seixos e calhaus rolados dispersos ou dispostos em leitos. As aluviões aumentam de espessura de Norte para Sul, chegando a atingir cerca de 35 metros de espessura a Sul na proximidade ao rio Mondego, e aumentam a sua compacidade/consistência ao longo da profundidade;
- Solos de alteração do maciço calcário - transição entre as aluviões e o maciço calcário onde se observam algumas argilas e argilas-arenosas, com fragmentos e calhaus de calcário carsificado que apresentam consistência rija/dura e espessura máxima de cerca de 7 metros.
- Calcários e arenitos - substrato rochoso do Cretácico que constitui calcários e calcários margosos apinhoados, calcários areníticos e margas assim como alguns arenitos finos e micáceos.

Tendo por base todos os ensaios e prospeções atrás referidos, apresentam-se de seguida os perfis Geológicos que foram obtidos aquando da realização do estudo e, portanto caracterizam as condições geológicas do terreno antes da construção da Central de Lares, até aos 40 metros de profundidade.

No que respeita à legenda exposta na figura 3.7, e aos respetivos tramos usados nas figuras, importa referir que se mostrou necessário alterar alguns elementos para se tornar mais visível o tipo de solo encontrado nas camadas mais superficiais. No entanto, com esta mudança, perdeu-se a distinção entre os calcários encontrados em profundidade mas, uma vez que estes solos não foram muito representativos para a dissertação, pensou-se ser a melhor opção.

LEGENDA:

Geologia












	Aterro arenoso.
	Resíduos industriais.
	Lodos arenosos e areias argilo-lodosas: Aluvião.
	Areias com restos de conchas: Aluvião.
	Areias com seixo rolado concentrado na base: Aluvião.
	Argila com elementos líticos calcários: Solos de alteração do maciço calcário.
	Arenito fino, micáceo.
	Calcário, calcário arenítico e calcário apinhoado.
	Calcário margoso.
	Marga calcária.
	Limite geológico

Figura 3.7 - Legenda referente aos perfis Geológicos apresentados

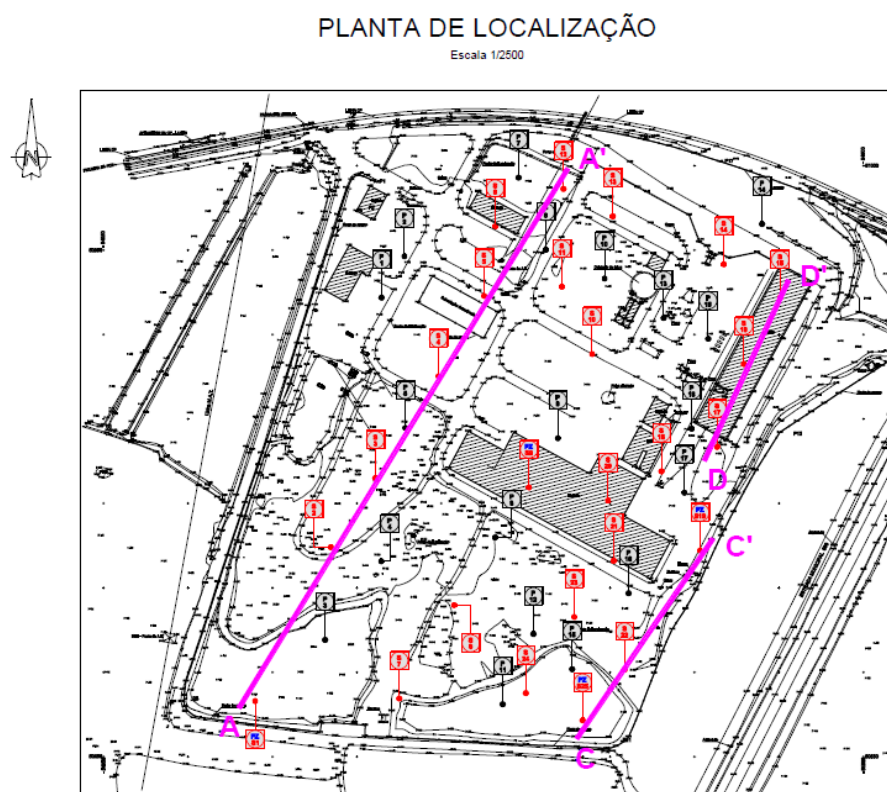


Figura 3.8 - Planta de Localização do Perfil A-A'

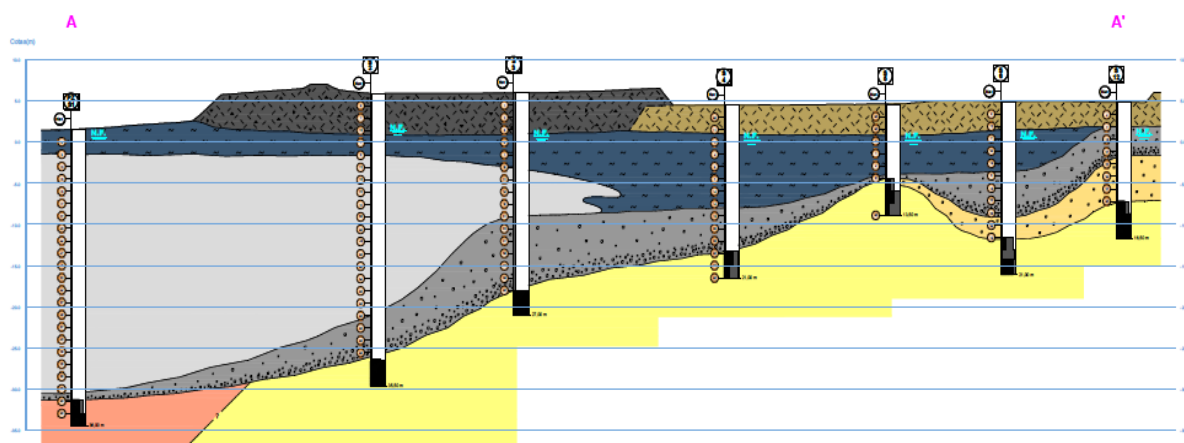


Figura 3.9 - Perfil Geológico A-A' representativo de um corte realizado ao longo de todo o comprimento do terreno

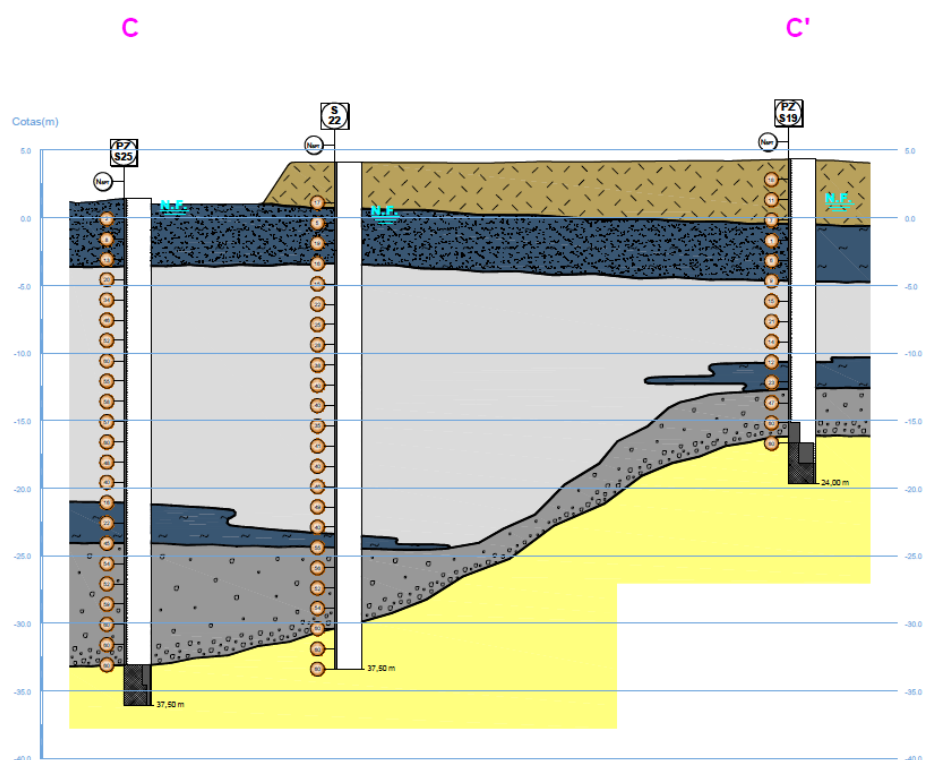


Figura 3.10 - Perfil Geológico C-C', que representa um corte de uma parte da lateral direita do terreno

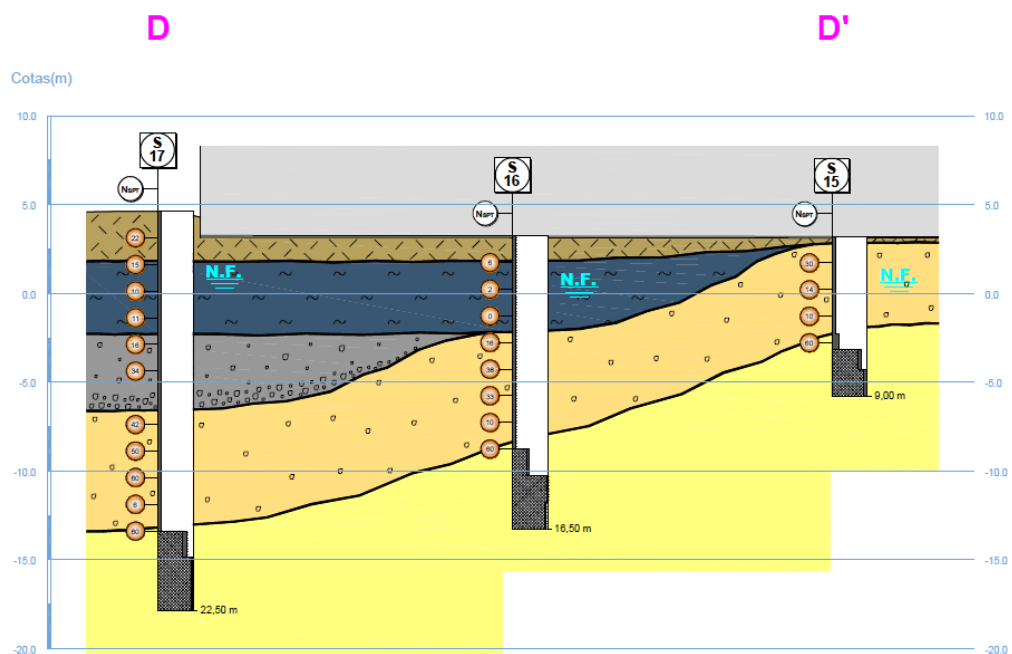


Figura 3.11 - Perfil Geológico C-C', que representa um corte de uma parte da lateral direita do terreno (2)

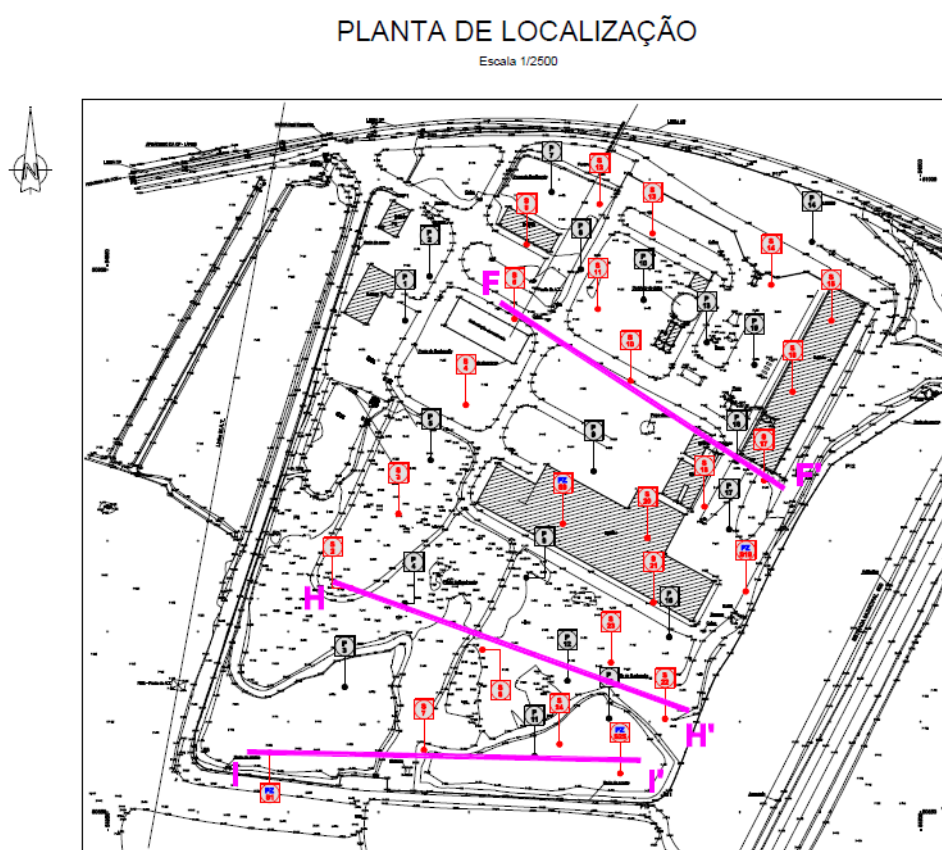


Figura 3.12 - Planta de Localização dos perfis representados na largura do terreno, à escala 1:2500

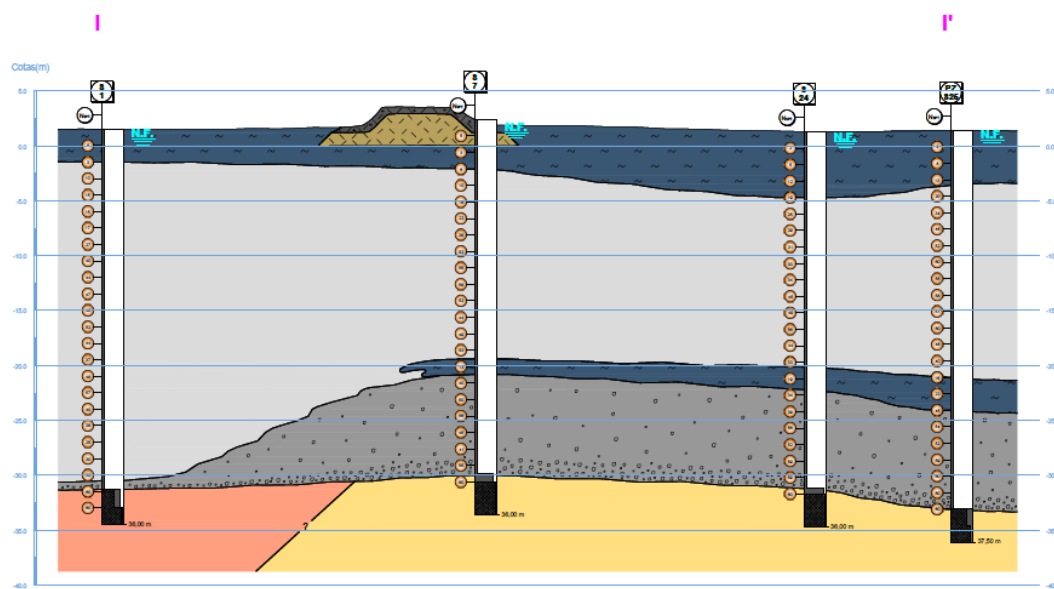


Figura 3.13 - Perfil geológico I-I' representativo da fronteira a Sul do terreno

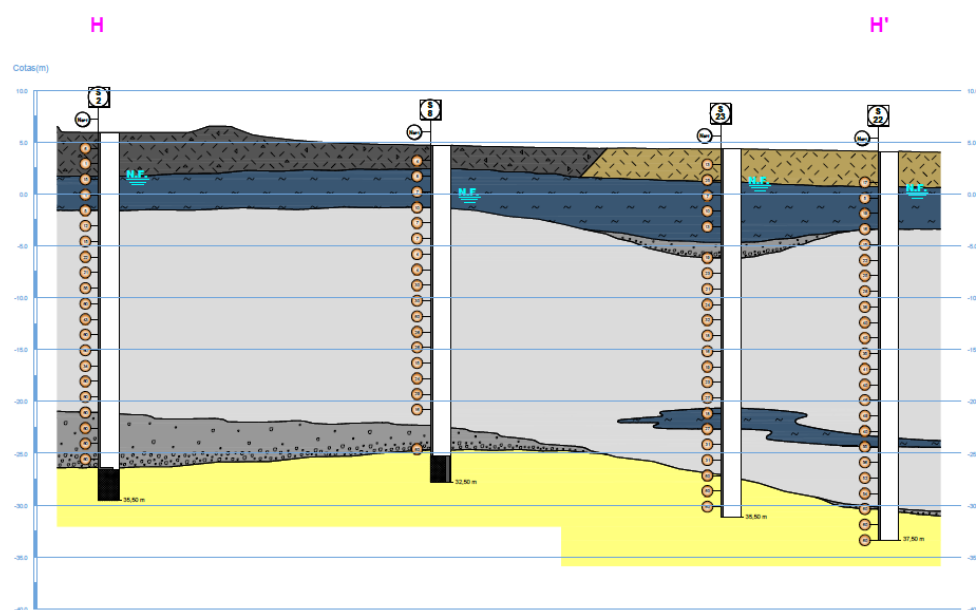


Figura 3.14 - Perfil geológico H-H' representativo da largura a meio do terreno

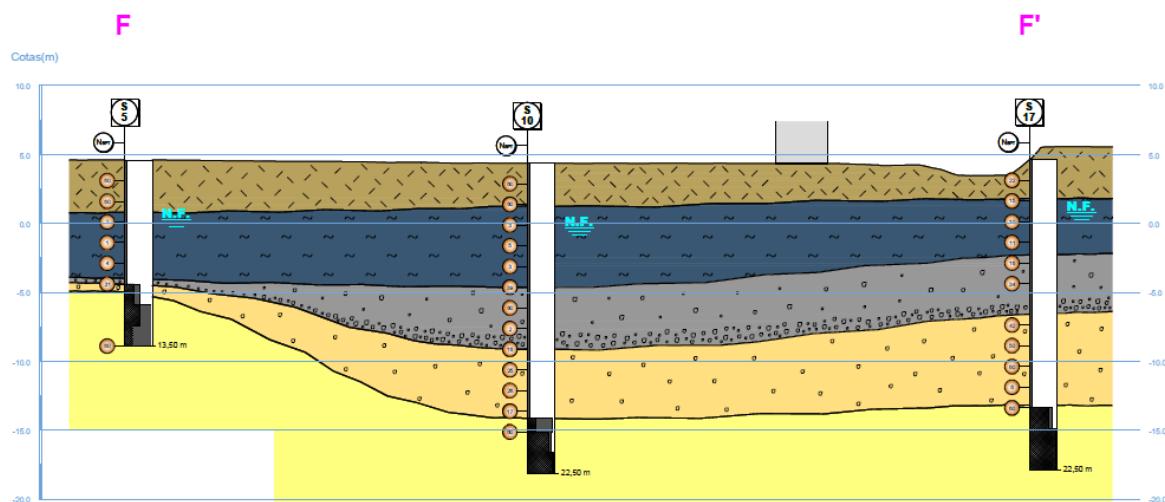


Figura 3.15 - Perfil geológico F-F' representativo da largura a meio do terreno

Após o desmantelamento da antiga fábrica, procedeu-se à remoção dos terrenos contaminados com resíduos de escórias de exploração. De seguida, foi realizado um aterro que elevou a cota geral da plataforma da Central até aos 7.00 metros, permitindo que a Central fique ao abrigo de possíveis inundações provocadas por cheias do Mondego.

Considerando que a cota inicial do terreno se apresentava inconstante, também a espessura do novo aterro é variável de ponto para ponto. Apresenta-se na figura 3.16 a representação, atual, do perfil geológico A-A', onde se representou este novo aterro a cor verde.

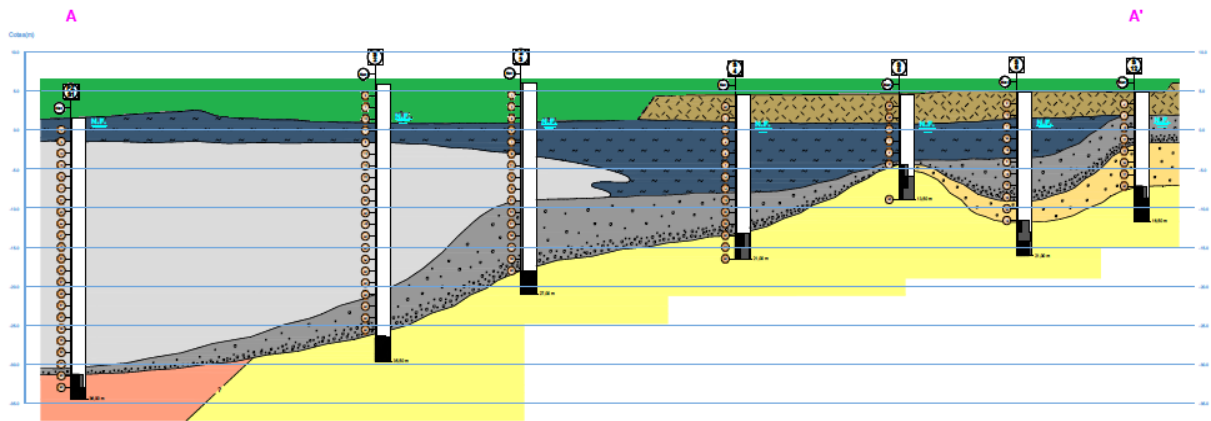


Figura 3.16 - Perfil Geológico A-A' representativo de um corte realizado ao longo do terreno atual, no qual se encontra representado o novo aterro que elevou a cota a 7 metros

3.3.3. PROPRIEDADES DOS ALUVIÕES MOLES DO BAIXO MONDEGO

Como se pode observar nos perfis geológicos apresentados, o maciço onde foi construída a obra apresenta alguma variabilidade de solos, na qual se destaca a existência de aluviões, “depósitos detríticos recentes, de natureza fluvial, lacustre, marinho, glacial ou gravitacional constituídos por cascalhos, areias, siltes e argilas, transportados e depositados por corrente” (IBGE, 1999).

As formações aluvionares foram bastante descritas em trabalhos anteriores, por estarem presentes numa grande parte do litoral português, e por constituir um tipo de solo mole onde tem havido um crescente número de construções.

Destaca-se o trabalho elaborado por Coelho (2000) na sua dissertação, em que foram estudadas amostras de solo provenientes da Quinta da Foja. Esta localiza-se no depósito aluvionar do Baixo Mondego, tal como a Central de Lares, apresentando, por isso, características geológicas idênticas, tal como é apresentado na figura 3.17.

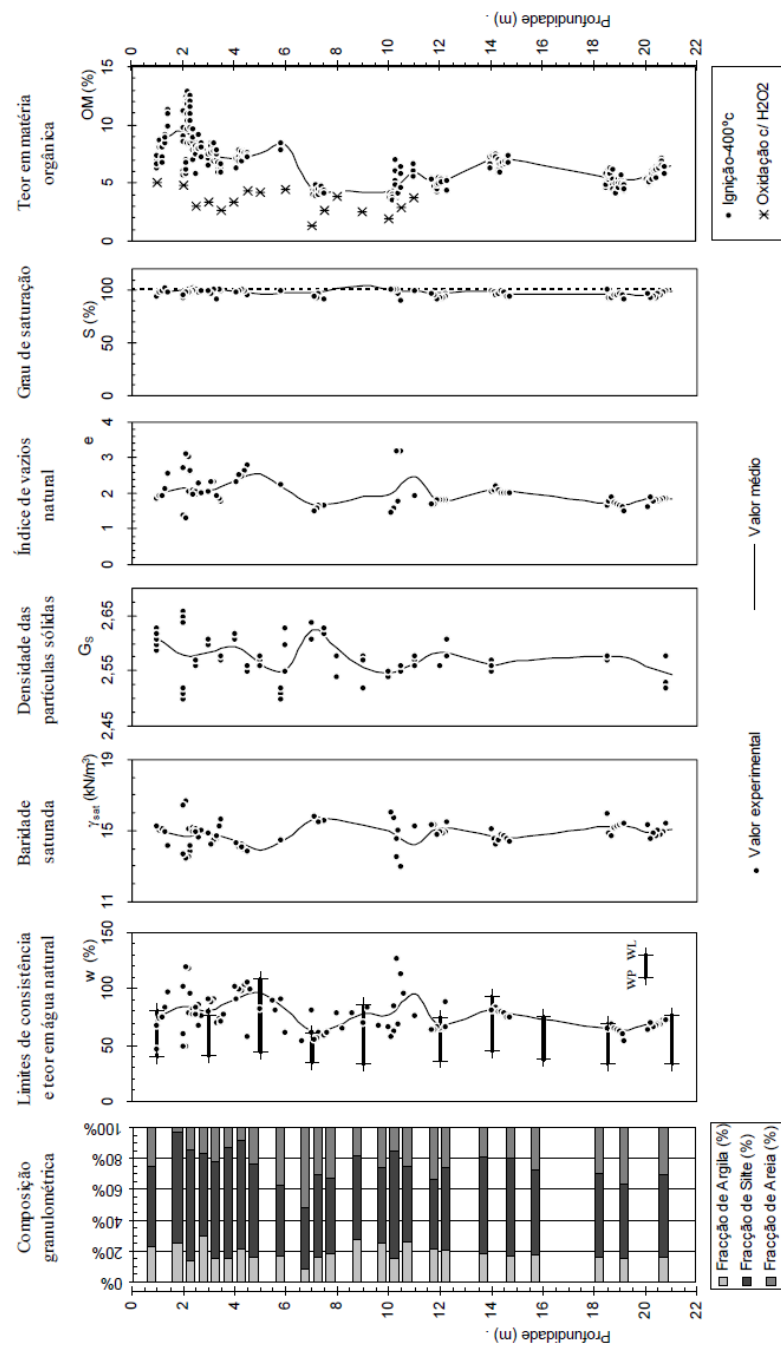


Figura 3.18 - Características dos solos presentes na Quinta da Foja (Coelho, 2000)

Da análise da figura 3.18, pode verificar-se que a fração de silte é a predominante neste solo e que a fração de argila é bastante reduzida (cerca de 20%). Quanto à plasticidade, esta é relativamente elevada e é devida ao teor considerável em matéria orgânica que o solo possui.

No que diz respeito ao teor natural em água, verificou-se que este é bastante próximo do limite de liquidez, explicando a reduzida consistência do solo. A proximidade destes valores e a sua plasticidade

conduzem a um valor absoluto do teor em água elevado e, consecutivamente, a um índice de vazios também alto.

Importa também referir a grande variabilidade de algumas características físicas, como o teor em água e o peso volúmico, que pode ser devida à variabilidade do teor em matéria orgânica, nomeadamente nas camadas superficiais do depósito.

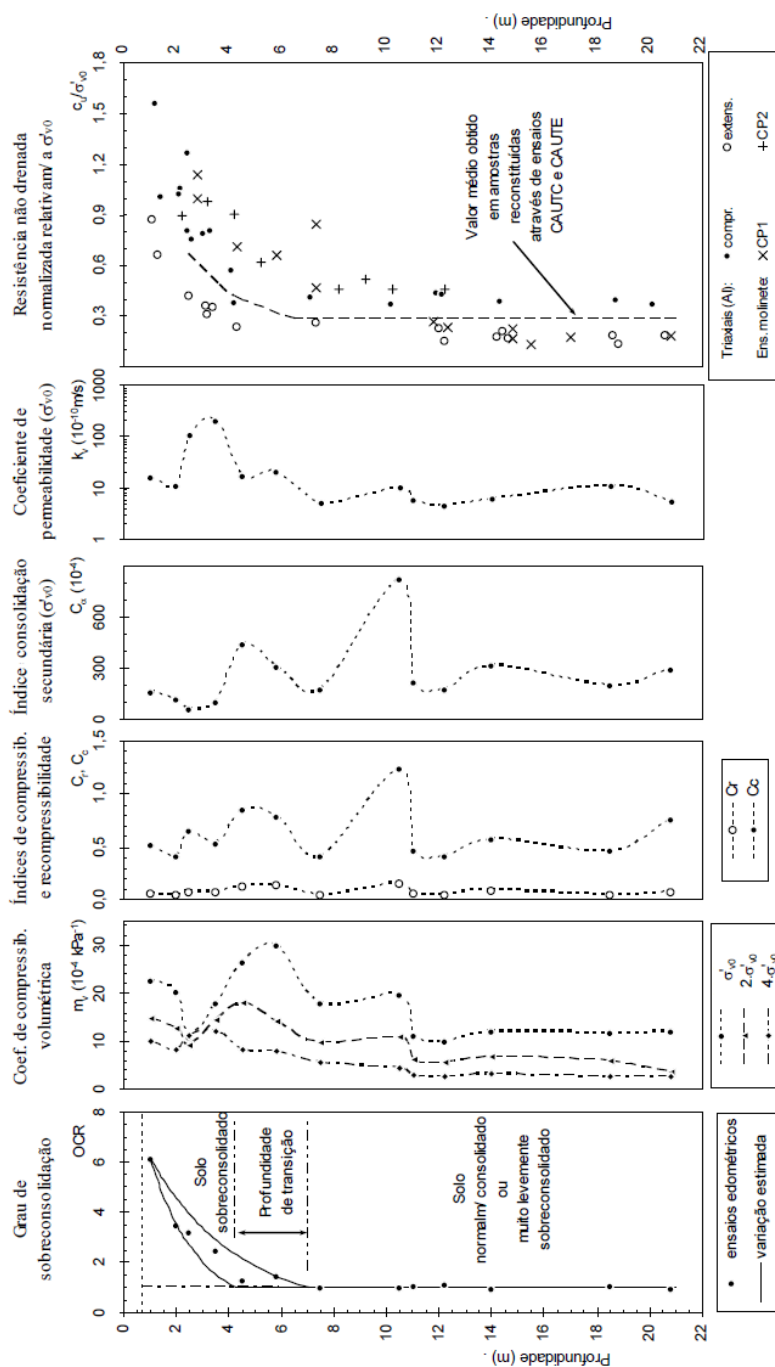


Figura 3.19 - Características dos solos presentes na Quinta da Foja (Coelho, 2000) (continuação)

A partir da figura 3.19, foi possível observar que o solo apresenta coeficientes de compressibilidade elevados. Particularmente, o coeficiente de compressibilidade volumétrica e o índice de compressibilidade, justificados pelo teor em água e índice de vazios natural referidos anteriormente, que refletem uma compressibilidade intrínseca do solo significativa.

Concluiu-se deste modo que o teor em matéria orgânica presente nas amostras testadas tem uma grande influência sobre as características e sobre o comportamento das aluviões do Baixo Mondego, que se apresentam como muito pouco consistente (Matos Fernandes, 2012).

Apresenta-se na figura 3.20 a curva experimental dos assentamentos diferidos no tempo, de uma argila mole do Baixo Mondego, apresentada por Coelho (2000).

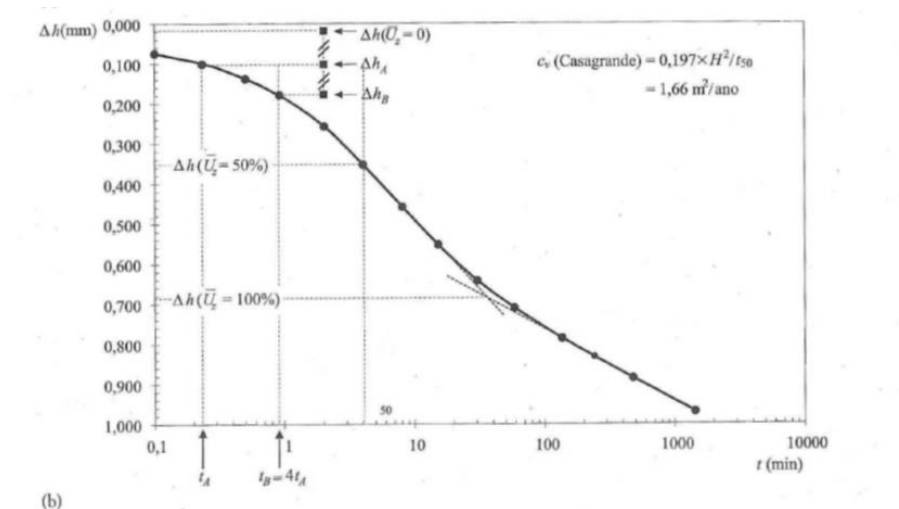


Figura 3.20 - Curva experimental tempo-assentamento de uma argila mole do Baixo Mondego (Coelho, 2000), apresentada por Matos Fernandes, 2012.

4

ASSENTAMENTOS NA VEDAÇÃO PERIFÉRICA DA CENTRAL DE LARES

4.1. INTRODUÇÃO

Os assentamentos ocorridos na estrutura da vedação periférica existente na Central de Lares, que limita toda a área que faz parte da obra, são o alvo de estudo neste capítulo.

Mostrou-se interessante fazer o estudo da zona periférica da obra, uma vez que esta estrutura apresenta uma carga pouco significativa e se encontra fundada sobre lintel, diretamente assente sobre o aterro colocado posteriormente aos trabalhos de remoção de resíduos.

Com este tipo de fundação, nestas condições de carregamento, qualquer assentamento sucedido deve-se a desníveis ocorridos no maciço onde foi construída a Central, devido à colocação do aterro no ano de 2007. Por isso, uma vez que o tipo de solo encontrado nesta área é bastante heterogéneo, os assentamentos apresentados deverão ser distintos ao longo de toda a periferia.

Serve o presente capítulo para apresentar os resultados das campanhas de medições topográficas realizadas nesta zona, de modo a tentar expor a grandeza dos assentamentos encontrados.

Os levantamentos topográficos foram efetuados pela EDP, e surgiram da necessidade de monitorizar o comportamento das diversas estruturas, após a fase de edificação. No entanto, os únicos dados a que foi possível aceder foram os que descrevem os desníveis sucedidos entre 2010 e 2016, ou seja, não representam os assentamentos imediatos.

4.2. LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS E RESPECTIVOS ASSENTAMENTOS OBTIDOS

Os movimentos verticais da estrutura que limita a Central foram obtidos em relação a 2 pontos de referência, localizados junto às chaminés do grupo 1 e do grupo 2, considerados fixos porque se têm apresentado estáveis ao longo do controlo.

O nivelamento geométrico foi desenvolvido ao longo de 23 linhas de nivelamento diferentes, nas quais foram usados vários pontos de observação para a determinação dos respetivos deslocamentos verticais, através da medição do desnível entre cada um deles.

Uma vez que no presente capítulo se estudará os assentamentos ocorridos na vedação periférica, a linha objeto de estudo será a “A”, cujo mapeamento se encontra na Figura 4.1.

As medições topográficas foram realizadas em 11 épocas diferentes, desde Junho de 2010 a Agosto de 2016, expostas na Tabela 4.2, sendo que a época 0 foi usada como referência para calcular os desníveis em todos os pontos.

Tabela 4.1 - Correspondência das épocas de medições topográficas ao respetivo ano e mês

Época	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Data	Jun 10	Ago 10	Jun 11	Fev 12	Ago 12	Mar 13	Nov 13	Out 14	Jun 15	Nov 15	Ago 16

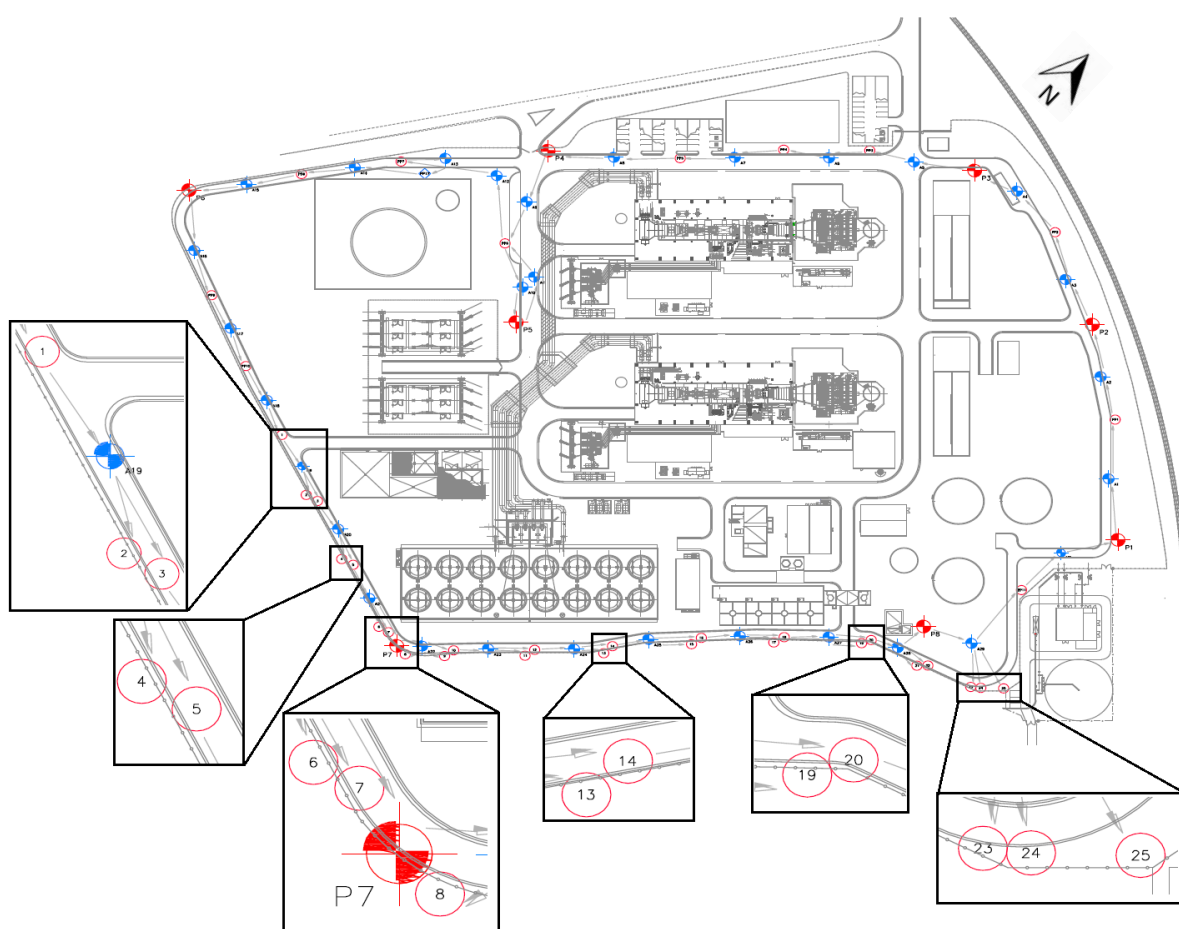


Figura 4.1 - Representação do mapa da vedação periférica e respetivos pontos, nos quais ocorreram as medições topográficas

Após a organização dos dados recolhidos dos relatórios topográficos, obteve-se os assentamentos gerados nos diferentes pontos de medição, localizados por toda a área periférica, durante 6 anos de funcionamento da Central de Lares. Representa-se na Tabela 4.2 todos os resultados numéricos dos assentamentos, correspondentes a cada ponto de medição e respetiva época de levantamento.

Tabela 4.2 - Resultados numéricos dos levantamentos topográficos realizados durante 6 anos de funcionamento da Central de Lares, em cada ponto de medição

Nº Ponto	época 0	época 1	época 2	época 3	época 4	época 5	época 6	época 7	época 8	época 9	época 10
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	0,0	-11,6	-16,5	-24,7	-27,0	-30,4	-34,4	-36,3	-38,9	-39,6	-39,5
2	0,0	-10,6	-15,7	-24,5	-26,7	-30,8	-34,9	-37,2	-40,8	-41,4	-41,6
3	0,0	-10,3	-15,4	-24,2	-26,7	-30,5	-34,7	-37,2	-40,8	-41,1	-41,4
4	0,0	-11,0	-15,3	-25,6	-28,8	-32,9	-38,1	-41,7	-46,3	-47,4	-47,9
5	0,0	-10,5	-15,1	-25,0	-28,3	-32,3	-37,4	-41,2	-45,6	-46,5	-47,3
6	0,0	-6,2	-9,3	-18,6	-20,7	-24,3	-29,2	-33,1	-37,2	-38,5	-39,2
7	0,0	-6,2	-9,0	-18,7	-20,7	-24,3	-29,3	-33,2	-37,0	-38,7	-39,0
8	0,0	-5,3	-8,2	-18,3	-19,7	-23,3	-27,9	-32,7	-36,2	-37,3	-37,9
9	0,0	-7,6	-11,2	-22,3	-24,6	-28,8	-33,1	-36,7	-40,7	-42,2	-42,9
10	0,0	-8,0	-11,7	-23,2	-25,3	-29,6	-33,7	-37,5	-41,4	-43,0	-44,0
11	0,0	-5,9	-8,4	-17,4	-21,4	-22,9	-27,4	-29,9	-32,3	-33,5	-32,8
12	0,0	-5,7	-8,0	-17,1	-21,3	-22,6	-27,3	-29,5	-32,1	-33,4	-32,9
13	0,0	-5,0	-7,6	-15,4	-17,8	-20,8	-24,5	-27,1	-30,2	-31,4	-32,2
14	0,0	-5,3	-8,1	-16,0	-18,2	-21,4	-25,2	-28,2	-31,2	-32,2	-32,9
15	0,0	-3,5	-5,5	-12,8	-14,5	-17,4	-21,2	-23,8	-25,8	-27,7	-28,3
16	0,0	-3,7	-5,8	-13,1	-14,7	-17,6	-21,4	-23,9	-26,4	-28,4	-28,7
17	0,0	-1,3	-2,5	-6,0	-7,4	-8,7	-10,4	-11,3	-13,8	-14,0	-13,6
18	0,0	-1,0	-2,1	-5,5	-6,7	-7,9	-9,8	-10,7	-13,0	-13,1	-12,8
19	0,0	-0,4	-0,3	-2,9	-2,7	-4,4	-5,9	-6,4	-7,9	-8,4	-8,9
20	0,0	-0,6	-0,5	-3,1	-2,5	-4,9	-6,5	-7,2	-8,7	-9,3	-10,1
21	0,0	-2,9	-3,4	-6,6	-6,9	-9,5	-11,2	-12,9	-14,8	-16,0	-16,5
22	0,0	-2,6	-3,2	-6,3	-6,9	-9,3	-11,1	-13,0	-14,8	-16,1	-16,5
23	0,0	-3,5	-4,8	-9,2	-11,0	-14,3	-17,7	-20,1	-22,1	-23,5	-24,4
24	0,0	-3,5	-4,7	-8,8	-11,1	-14,1	-17,6	-20,1	-21,9	-23,3	-24,2
25	0,0	0,8	1,1	0,3	-0,6	-0,9	-1,5	-1,1	-1,1	-2,0	-0,8

Foi com estes valores que se realizaram as representações gráficas, apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3.

Na Figura 4.2 representa-se a evolução dos assentamentos em vários pontos de medição usados na vedação periférica da área da central, onde se pode observar a grandeza de valores registados, em milímetros. Enquanto na Figura 4.3, se representam as evoluções em todos os pontos que foram alvo de estudo, num gráfico de colunas, no qual se tornou mais perceptível quais os locais da periferia apresentaram desníveis superiores.

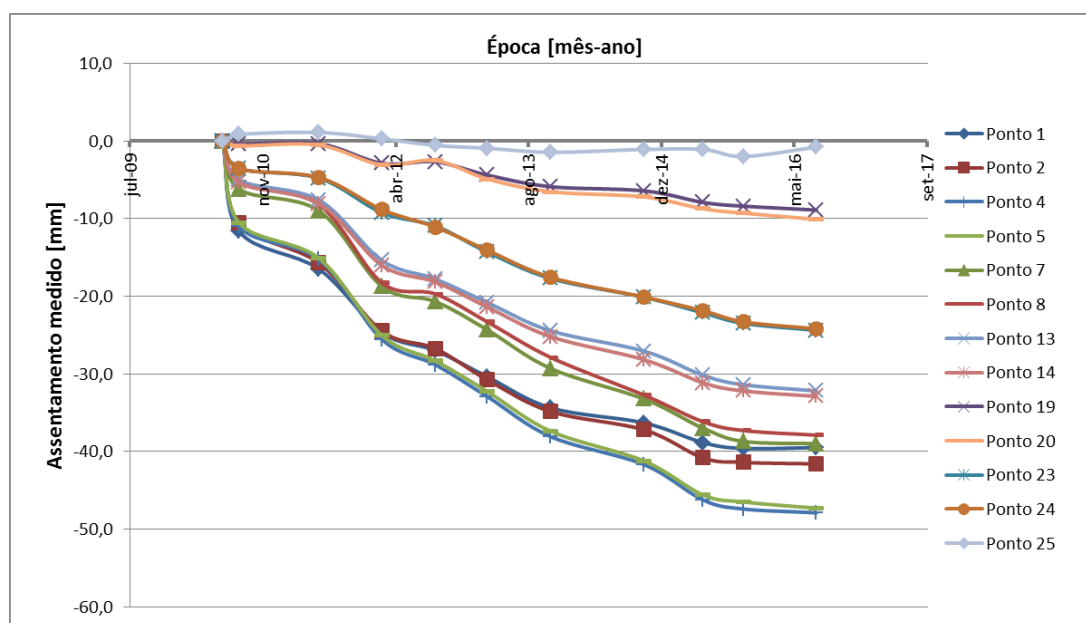


Figura 4.2 - Evolução dos assentamentos de alguns pontos da vedação periférica, obtidos através de levantamentos topográficos realizados desde Junho de 2010 até Agosto de 2016

Assentamento medido
[mm]

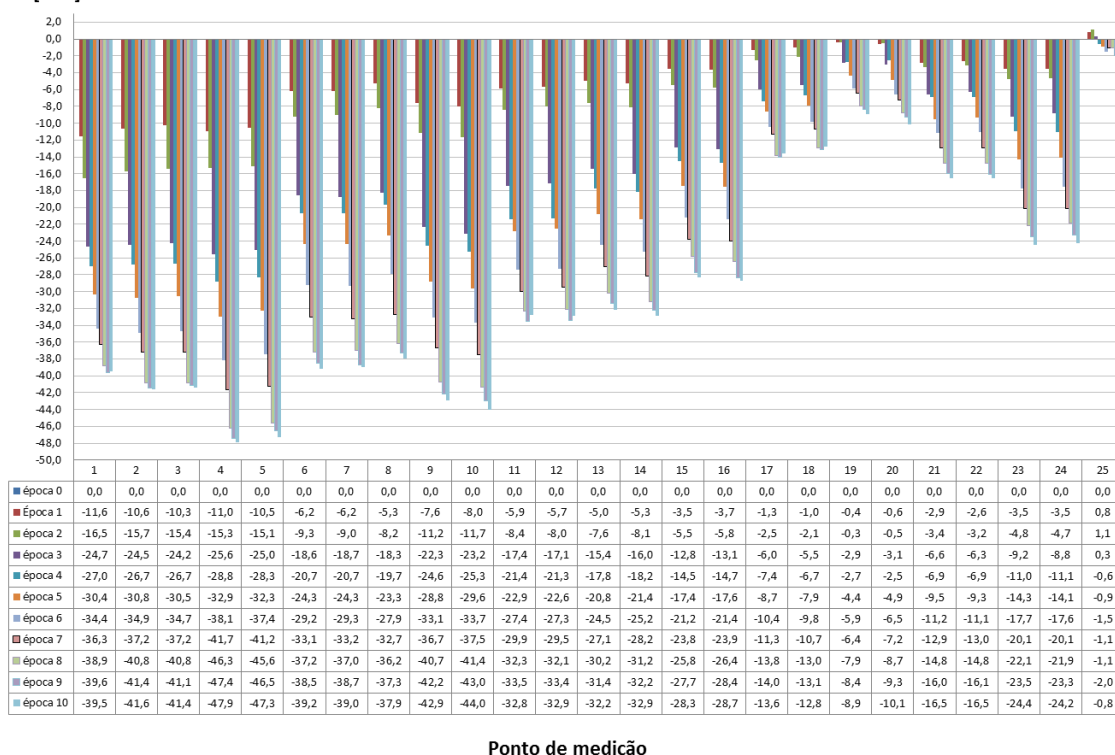


Figura 4.3 - Evolução dos assentamentos ocorridos em todos os pontos alvo de estudo na vedação periférica, ao longo das épocas de medição

4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS

Da análise da Figura 4.2, e dos respetivos valores de assentamentos expostos na Tabela 4.2, pôde constatar-se que, de facto, o solo de fundação da área da Central sofreu valores de assentamentos bastante diferentes, sendo que nalgumas zonas estes se apresentaram elevados.

A partir das leituras provenientes dos levantamentos topográficos, realizados desde Junho de 2010 até Agosto de 2016, foram detetados desníveis que variaram desde valores quase nulos, no ponto 25, até 41,6 milímetros, no ponto 4. Por outro lado, como se pode verificar na Figura 4.3, entre pontos próximos os desníveis são da mesma ordem de grandeza.

Analisando a evolução do desenvolvimento destes valores, pôde observar-se que os assentamentos vão diminuindo de Sul para Este da vedação, respetivamente do início dos levantamentos até aos últimos pontos de medição. Verificou-se, nomeadamente, que o troço que apresentou mais assentamento foi a zona Sul da obra, correspondente aos pontos 1 a 16 e, particularmente, nos pontos 4 e 5.

Considerando o facto de a estrutura da vedação periférica apresentar uma carga pouco significativa, estes valores são essencialmente consequência da consolidação decorrente do aterro colocado e que dependem, unicamente, da zona em estudo e das características do solo de fundação.

Tendo presente a informação referida no capítulo 3, nomeadamente dos perfis geológicos na área de construção da central, surge a explicação para alguns dos valores apresentados nos assentamentos da fundação. Observando detalhadamente as Figuras 3.10, 3.11, e 3.13, que caracterizam as áreas periféricas referidas, pode constatar-se que, acompanhando a diminuição de assentamentos, há uma diminuição da espessura da formação aluvionar, em particular das camadas argilosas, sendo estas praticamente inexistentes na zona perimetral localizada a Este.

Como foi referido nesse mesmo capítulo, as formações aluvionares do Baixo Mondego apresentam alto teor em matéria orgânica, que lhes confere uma plasticidade elevada e, tendo em conta que este solo apresenta um teor em água natural muito próximo do limite de liquidez, apresenta igualmente um índice de vazios elevado. Estes solos, naturalmente, apresentam compressibilidade muito elevada, demonstrando-se na redução de volume ao sofrer carregamento, neste caso pelo aterro colocado previamente à construção das estruturas da Central.

No que diz respeito às variações de nivelamento observadas no ponto de leitura 25, podem ser explicadas tanto pela inexistência de formação aluvionar nesta zona, como podem ser devido a valores tão reduzidos de deslocamentos, que poderão ficar próximos da margem de erro dos levantamentos topográficos.

A presente análise permitiu demonstrar a existência de diversos tipos de solo em toda a área da Central, assim como a diversidade de condições em que os maciços ali presentes se encontram. Estas condições do solo geram comportamentos diferentes adotados, em resposta ao carregamento, que conduzem a assentamentos diferenciais.

Permitiu, igualmente, demonstrar a necessidade de recorrer a opções estruturais que sejam capazes de controlar os assentamentos a ocorrer nas estruturas principais da Central, nomeadamente à construção de fundações sobre estacas nos maciços, para tentar reduzir a influência da grande instabilidade das formações aluvionares nos assentamentos, gerados devido ao carregamento destes estratos. Como vai ser exposto no capítulo seguinte, foi este o tipo de solução que se optou instalar.

5

ESTIMATIVA DA EVOLUÇÃO DOS ASSENTAMENTOS NO CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

5.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

5.1.1. INTRODUÇÃO

Em 2007 a obra da Central de Lares foi iniciada, tendo sido realizada nessa altura a remoção dos resíduos industriais encontrados à superfície do terreno e, posteriormente, construído o aterro que elevou a cota de projeto para 7 metros.

Após a colocação deste aterro, foi realizada a implantação das tubagens enterradas e a construção das superestruturas da central termoeletrica. Durante o primeiro semestre do ano 2008, foram terminados os trabalhos referente ao aterro da plataforma e a construção do Circuito de Água de Refrigeração, também designado por CAR.

A partir de Julho de 2010, detetaram-se roturas nas condutas do sistema de refrigeração, sendo que, até 2016, ocorreram 15. Face a estas constatações, foi necessário analisar a situação com vista a encontrar uma explicação para o ocorrido e encontrar uma solução que evitasse novas ocorrências.

5.1.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Considerando que o objetivo prático subjacente à realização do trabalho presente passa pela resolução de problemas gerados no sistema de refrigeração da Central, nomeadamente no seu circuito de água, é feita de seguida a descrição do sistema em questão.

O sistema de refrigeração da Central, que fornece o caudal de água para a refrigeração do condensador da turbina a vapor, é do tipo fechado e são usadas torres de refrigeração do tipo húmido.

Fazem parte deste sistema o circuito de água de refrigeração, em que a água é arrefecida ao entrar em contacto com um fluxo ascendente de ar, que conduz à evaporação de uma parte do seu caudal. Por isso, é necessário haver também um caudal de água de compensação, que tanto compensa estas perdas por evaporação, como garante um fator de concentração de sais entre 1,6 e 2.

A água de compensação é captada no Rio Mondego, no talude do leito central, e é conduzida para a Central através de uma conduta subterrânea com recurso a duas bombas.

Existe ainda outra conduta, com o fim de rejeitar a água de purga do sistema de refrigeração que é conduzida para o Rio Mondego, também alojada no seu talude central (Coelho e Ferreira, 2016).

5.1.3. CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

O Circuito de Água de Refrigeração envolve 2 condutas DN2000 de PRFV por cada grupo, uma de compressão e outra de retorno, que unem a torre de refrigeração ao edifício da turbina de cada grupo, como representado na Figura 5.1. Paralelamente a estas condutas, corre uma conduta DN150 por grupo, igualmente de PRFV, para o circuito auxiliar de refrigeração.



Figura 5.1 - Fotografia aérea da Central de Lares e respetivo circuito de água de refrigeração (EDP, 2016)

Todas as condutas estão enterradas e dispõem de maciços de ancoragem nas mudanças de direção. Estes maciços possuem fundação direta, excetuando o contíguo às eletrobombas, que é fundado sobre estacas, assim como o maciço de suporte às eletrobombas, junto à torre de refrigeração, e os edifícios das turbinas dos Grupos 1 e 2 (EDP, 2016).

A fundação direta é caracterizada por transmitir a carga vinda da estrutura, a uma camada próxima da superfície do terreno (Matos Fernandes, 2012), enquanto a fundação por estacas consiste num tipo de fundação profunda, que transmite a carga ou para estratos mais rígidos, ou através de fricção entre o solo e a estaca (Som e Das, 2006).

A grande diferença no funcionamento destas soluções, reside no facto de na fundação direta a interação com o terreno para equilíbrio da carga vertical, que não se dá pela base, ser desprezável, inverso ao que ocorre nas estacas (Matos Fernandes, 2011). É ainda importante referir que, em presença de solos pouco rígidos, como no caso em estudo, a fundação direta apresenta assentamentos superiores em comparação com outras soluções.

O uso de fundações sobre estacas foi a solução adotada em projeto, uma vez que a Central se encontra num solo muito pouco estável, nomeadamente na presença de grandes formações aluvionares pouco consistentes e muito compressíveis. Com o uso das estacas tentou-se minimizar os assentamentos ocorridos, principalmente nas secções mais importantes ao seu funcionamento, transmitindo a sua carga para o maciço rochoso na base dos aluviões, constituído por calcários.

5.1.4. AVALIAÇÃO DAS ROTURAS

Desde que se iniciaram os problemas nas condutas, foi detetado a ocorrência de 15 roturas, das quais 7 nas condutas DN2000 do circuito principal e 8 nas DN150 do circuito auxiliar.

Ao observar a sua localização, apresentada na Figura 5.2, pôde verificar-se que estas se sucederam, repetidamente, nos mesmos locais e que todas elas ocorreram na proximidade dos maciços de mudança de direção das condutas, com particular destaque na imediação do maciço fundado sobre estacas, junto à torre de refrigeração.

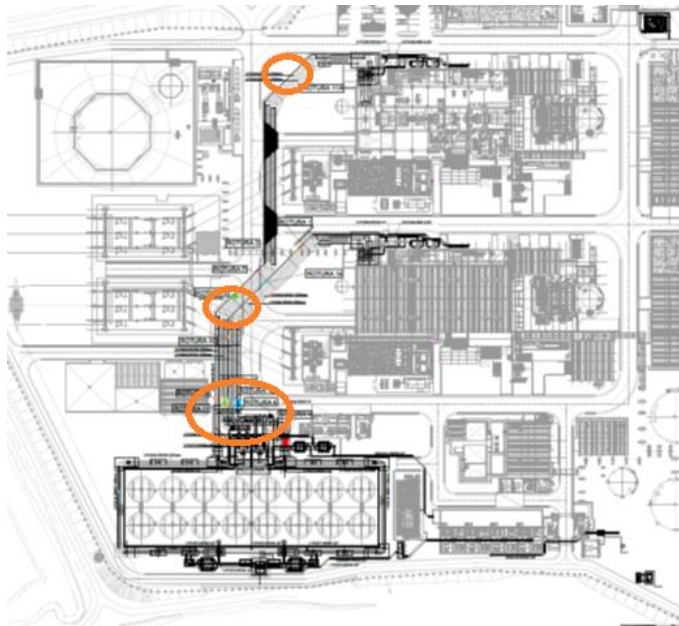


Figura 5.2 - Localização das roturas no mapa do circuito de refrigeração (EDP,2016)

Ao proceder à análise pormenorizada da informação a que foi possível aceder, nomeadamente a apresentada em capítulos anteriores, e ao histórico relacionado com as roturas ocorridas, procurou-se encontrar a causa dos problemas.

As condições geológicas do local, destacam a presença de formações aluvionares que conferem bastante instabilidade ao solo, por possuírem baixa consistência e elevada compressibilidade. Nomeadamente, quando estas sofrem carregamento, apresentam elevada taxa de consolidação e, por isso, ocorrem elevadas deformações volumétricas.

Considerando que as soluções estruturais escolhidas para as fundações dos maciços das estruturas da obra foram diferentes, pôde verificar-se que ocorreram assentamentos distintos dependendo da área em questão. Nas estruturas assentes sobre estacas registam-se assentamentos bastante inferiores aos das estruturas fundadas diretamente sobre o solo.

A diferença ocorrida nos assentamentos foi confirmada ao observar os resultados das campanhas de medições topográficas, como apresentado a título de exemplo na Figura 5.3, referente a marcas do circuito de águas de refrigeração, apresentadas no seu mapeamento exposto na Figura 5.5.

As marcas 164 e 170 são referentes à torre de refrigeração, que se encontra sob fundação por estacas, enquanto as marcas 178 e 179 caracterizam a zona de um dos maciços de ancoragem na mudança de direção que possuem fundação direta. Como se pode observar, durante os 6 anos nos quais se procedeu ao levantamento dos assentamentos, houve uma diferença de valores de cerca 30 milímetros.

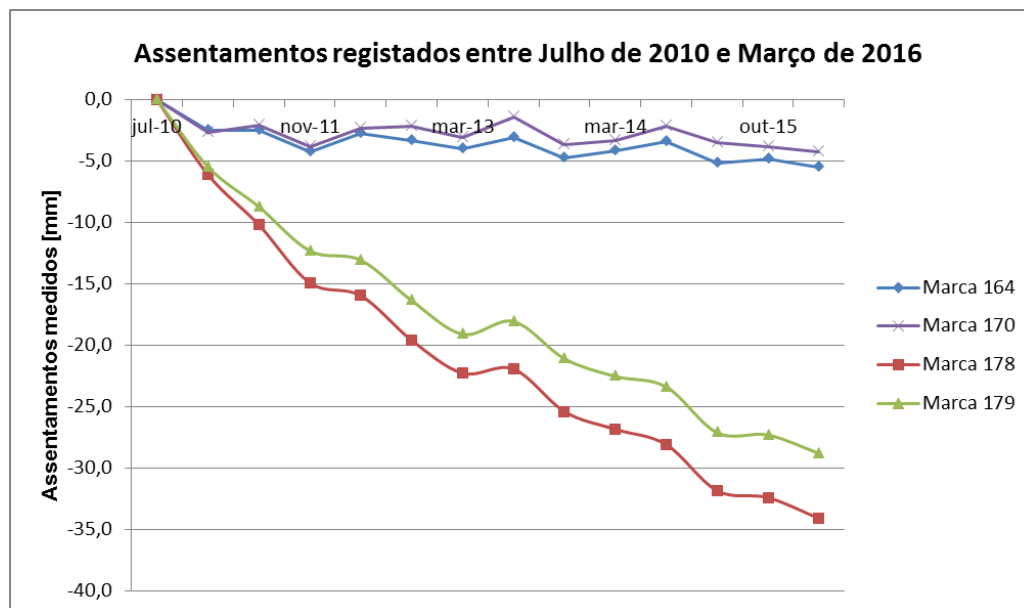


Figura 5.3 - Assentamentos registados no circuito de água de refrigeração em marcas nos maciços de ancoragem e na proximidade à torre de refrigeração

Como se pode verificar na disposição das condutas, estas realizam uma ligação entre os maciços de ancoragem de mudança de direção, fundados diretamente sobre o solo, e os maciços que se encontram fundados sobre estacas, com assentamento inferior.

A geologia do local aliada à disposição referida, levaram à presença de assentamentos diferenciais ao longo do CAR, que se depreendeu terem causado esforços nas condutas, que por sua vez conduziram à ocorrência de roturas.

Após uma cuidadosa ponderação de soluções possíveis para este problema, excluiu-se a sua resolução pela via estrutural, dada a sua complexidade, de conceção e de execução, assim como o seu elevado custo, optando-se pela via da flexibilização das condutas junto aos maciços.

A solução de flexibilização será realizada à custa da inserção nas condutas de um tubo-biela, representado em esquema na Figura 5.4, que em termos estruturais funciona como uma rótula que terá de ser dimensionado para suportar assentamentos posteriores à sua instalação. Em consequência, tornou-se necessário estimar os assentamentos para os quais estes dispositivos deverão ser dimensionados.

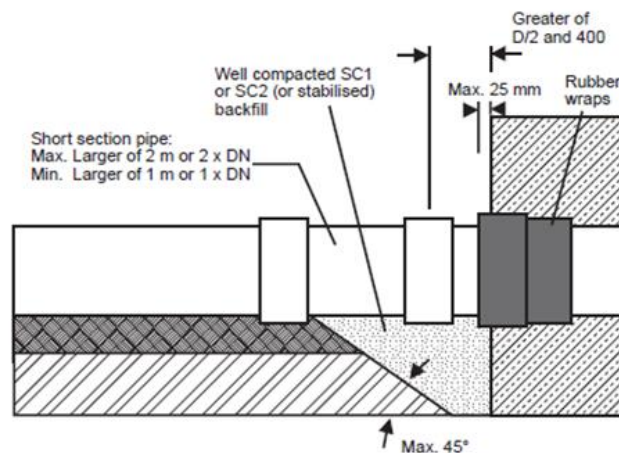


Figura 5.4 - Esquema representativo de um tubo-biela (EDP,2016)

5.1.5. OBJETIVOS

No presente capítulo, será realizada a estimativa da evolução dos assentamentos nos maciços de apoio das condutas do Circuito de Água de Refrigeração (CAR), com recurso às ferramentas de cálculo do editor Excel. Esta estimativa foi realizada tendo como base os resultados obtidos nas campanhas de levantamentos topográficos efetuadas pela EDP, desde 2010.

Com os valores resultantes das medições topográficas foi possível aceder aos assentamentos ocorridos até 2016, nas diferentes estruturas da central e serão, através das equações da teoria da consolidação expostas no capítulo 2 e da metodologia posteriormente apresentada, usados para estimar os assentamentos que se espera virem a ocorrer até ao ano de 2040, correspondente ao fim da vida útil estimada para o funcionamento da Central de Lares.

5.2. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E RESPECTIVOS ASSENTAMENTOS OBTIDOS

Os movimentos verticais ocorridos nas condutas do Circuito de Águas de Refrigeração foram conseguidos segundo o mesmo procedimento usado na determinação dos desníveis da vedação periférica, através de diferentes pontos de observação, sendo que neste caso a linha correspondente foi a linha H, representado o seu mapeamento na figura 5.5.

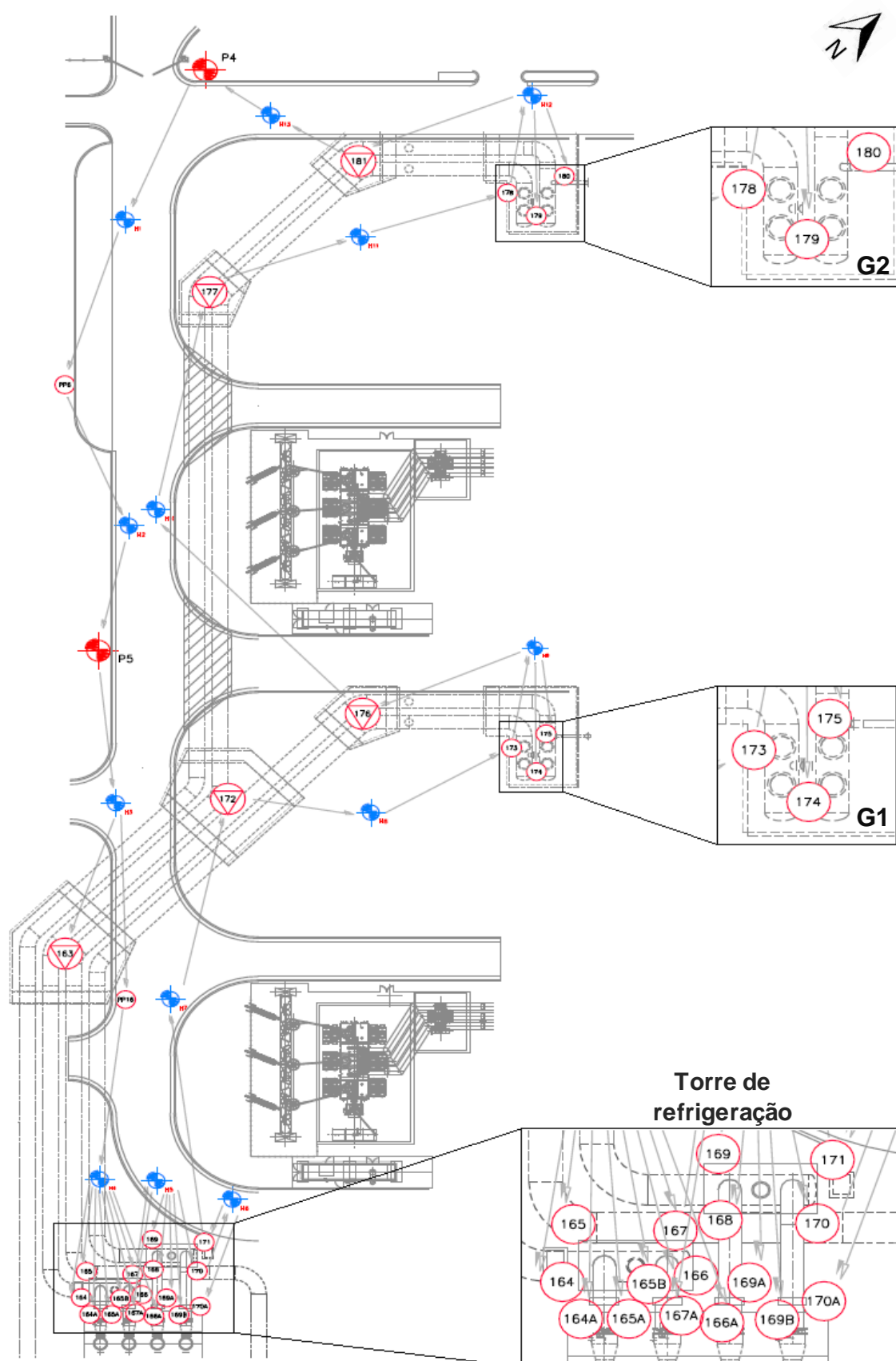


Figura 5.5 - Representação do mapa da linha e respetivos pontos, nos quais ocorreram medições topográficas

As medições foram feitas em diversas épocas ao longo dos últimos anos, o que permitiu obter o assentamento ocorrido até à última medição, através do cálculo da diferença entre os valores obtidos em cada época e os referentes à época 0, usada então como referência. São de seguida expostos os resultados dos cálculos realizados nos pontos que foram considerados representativos para o problema em questão, na Tabela 5.2, e as respetivas datas em que os levantamentos topográficos foram efetuados (ano e mês), na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Correspondência das épocas de medições topográficas ao respetivo Ano e Mês

Época	0	1	2	2.1	3	4	5	5.1	6	6.1	7	8	9	10
Data	Jul 10	Jan 11	Jun 11	Nov 11	Mar 12	Set 12	Mar 13	Jun 13	Dez 13	Mar 14	Mar 14	Maio 15	Out 15	Mar 16

Tabela 5.2- Resultados dos assentamentos ocorridos em cada ponto objeto de estudo na linha H, em mm

Nº Ponto	época 0	época 1	época 2	época 2.1	época 3	época 4	época 5	época 5.1	época 6	época 6.1	época 7	época 8	época 9	época 10
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
163	0,0	-3,2	-3,8	-6,9	-6,0	-6,6	-8,4	-7,5	-9,9	-9,6	-9,5	-11,0	-11,0	-12,2
164	0,0	-2,5	-2,5	-4,2	-2,8	-3,3	-4,0	-3,1	-4,7	-4,2	-3,4	-5,2	-4,8	-5,5
165	0,0	-2,6	-2,5	-4,4	-2,9	-3,2	-3,8	-2,8	-4,7	-4,1	-3,4	-4,8	-4,6	-5,4
166	0,0	-2,8	-2,3	-4,1	-2,6	-3,2	-3,8	-3,0	-4,6	-4,4	-3,2	-4,9	-4,3	-5,5
167	0,0	-2,7	-2,1	-4,0	-2,6	-2,8	-3,3	-2,3	-4,2	-3,7	-2,8	-4,3	-4,4	tapada
168	0,0	-2,7	-1,9	-3,8	-2,6	-2,4	-3,2	-1,9	-3,9	-3,6	-2,5	-4,0	-4,1	-4,6
169	0,0	-2,6	-2,2	-4,1	-2,7	-2,9	-3,4	-1,8	-4,1	-3,8	-2,8	-4,5	-4,8	-4,6
170	0,0	-2,7	-2,1	-3,8	-2,3	-2,2	-3,1	-1,4	-3,6	-3,3	-2,2	-3,5	-3,8	-4,2
171	0,0	-2,6	-2,2	-4,1	-2,7	-3,0	-3,5	-1,8	-4,0	-3,9	-2,8	-4,3	-4,8	-4,7
172	0,0	-3,7	-4,8	-8,4	-7,6	-9,4	-11,0	-9,6	-13,3	-13,3	-13,2	-15,6	-16,2	-17,4
173	0,0	-4,6	-6,3	-10,3	-9,6	-12,4	-14,2	-13,3	-16,7	-17,7	-17,1	-20,5	-21,1	-22,0
174	0,0	-4,3	-5,6	-9,1	-8,3	-11,3	-13,3	-12,2	-15,1	-16,4	-15,5	-18,8	-19,4	-20,0
175	0,0	-4,5	-6,1	-10,0	-9,4	-12,1	-14,6	-13,2	-16,3	-17,8	-17,1	-20,3	-21,0	-22,1
176	0,0	-3,7	-4,5	-7,7	-6,7	-9,0	-10,6	-9,2	-12,2	-13,1	-12,5	-15,0	-15,8	-16,0
177	0,0	-5,2	-8,4	-12,8	-13,4	-16,5	-18,9	-18,1	-22,1	-23,3	-23,8	-27,4	-28,0	-29,4
178	0,0	-6,1	-10,2	-14,9	-16,0	-19,6	-22,3	-21,9	-25,4	-26,8	-28,1	-31,8	-32,4	-34,1
179	0,0	-5,5	-8,7	-12,3	-13,1	-16,3	-19,1	-18,1	-21,1	-22,5	-23,4	-27,1	-27,3	-28,8
180	0,0	-6,5	-10,0	-14,7	-16,1	-19,4	-22,7	-21,7	-25,3	-26,7	-28,0	-31,5	-32,2	-33,7
181	0,0	-6,0	-9,8	-14,6	-15,5	-19,0	-22,0	-21,2	-25,6	-26,0	-27,3	-30,8	-31,5	-33,2

Da análise dos resultados apresentados foi possível verificar a discrepância entre os valores registados na zona próxima à torre de refrigeração, como por exemplo no ponto 164 em que o assentamento registado em Março de 2016 foi de apenas 5,5 milímetros, e o restante circuito de águas. Uma vez que a torre de refrigeração se encontra sobre um maciço fundado sobre estacas, estes valores comprovam que nas zonas com este tipo de fundação os assentamentos são bastante reduzidos, também como referido no subcapítulo anterior, nomeadamente na Figura 5.3.

Tendo em conta o objetivo do presente capítulo, foi decidido não considerar os valores referentes aos pontos do maciço fundado por estacas, uma vez que estes assentamentos são reduzidos e têm tendência a manter-se nestes valores, não sendo, por isso, representativos para o problema em questão.

No que se apresenta de seguida, nomeadamente na Tabela 5.3, deixam de ser considerados os seguintes pontos: 164,165, 166,167, 168,169,170 e 171.

Tabela 5.3- Resultados dos assentamentos ocorridos na linha H, em mm, após seleção dos pontos representativos para o problema em questão

Nº Ponto	época 0 mm	época 1 mm	época 2 mm	época 2.1 mm	época 3 mm	época 4 mm	época 5 mm	época 5.1 mm	época 6 mm	época 6.1 mm	época 7 mm	época 8 mm	época 9 mm	época 10 mm
163	0,0	-3,2	-3,8	-6,9	-6,0	-6,6	-8,4	-7,5	-9,9	-9,6	-9,5	-11,0	-11,0	-12,2
172	0,0	-3,7	-4,8	-8,4	-7,6	-9,4	-11,0	-9,6	-13,3	-13,3	-13,2	-15,6	-16,2	-17,4
173	0,0	-4,6	-6,3	-10,3	-9,6	-12,4	-14,2	-13,3	-16,7	-17,7	-17,1	-20,5	-21,1	-22,0
174	0,0	-4,3	-5,6	-9,1	-8,3	-11,3	-13,3	-12,2	-15,1	-16,4	-15,5	-18,8	-19,4	-20,0
175	0,0	-4,5	-6,1	-10,0	-9,4	-12,1	-14,6	-13,2	-16,3	-17,8	-17,1	-20,3	-21,0	-22,1
176	0,0	-3,7	-4,5	-7,7	-6,7	-9,0	-10,6	-9,2	-12,2	-13,1	-12,5	-15,0	-15,8	-16,0
177	0,0	-5,2	-8,4	-12,8	-13,4	-16,5	-18,9	-18,1	-22,1	-23,3	-23,8	-27,4	-28,0	-29,4
178	0,0	-6,1	-10,2	-14,9	-16,0	-19,6	-22,3	-21,9	-25,4	-26,8	-28,1	-31,8	-32,4	-34,1
179	0,0	-5,5	-8,7	-12,3	-13,1	-16,3	-19,1	-18,1	-21,1	-22,5	-23,4	-27,1	-27,3	-28,8
180	0,0	-6,5	-10,0	-14,7	-16,1	-19,4	-22,7	-21,7	-25,3	-26,7	-28,0	-31,5	-32,2	-33,7
181	0,0	-6,0	-9,8	-14,6	-15,5	-19,0	-22,0	-21,2	-25,6	-26,0	-27,3	-30,8	-31,5	-33,2

Através da observação dos valores apresentados, chegou-se também à conclusão de que, em algumas épocas, os valores não eram coerentes com os obtidos em épocas anteriores.

A explicação encontrada para tais perturbações foi o facto de as medições terem sido realizadas em meses do ano bastante diferentes, assim como o dia e a hora da realização que podem levar a grandes variações. Dá-se como exemplo, as tensões efetivas no solo que dependem do nível freático, que por sua vez pode depender da hora em que se realizam as observações, uma vez que esta é uma zona bastante próxima da área costeira.

Considerando a inexistência de informação concisa acerca destes pormenores, concluiu-se que houve diferentes variáveis ao longo das épocas e foi necessário realizar uma seleção das épocas de medições, cujos resultados se afiguram consistentes no processo evolutivo associado ao processo de consolidação.

Com vista a detetar as épocas que mais perturbações provocaram na sequência lógica de valores dos assentamentos, foram ordenados todos os assentamentos obtidos, em dois gráficos assentamento *versus* época de medição. Na organização dos gráficos representaram-se os pontos mais próximos e, consequentemente, com assentamentos similares, caracterizando os pontos referentes às condutas do circuito de águas de refrigeração que abastecem o Grupo 1 (Tabela 5.4) e às que abastecem o Grupo 2 (Tabela 5.5).

Realça-se que os pontos de medição 172 e 163 são comuns a ambos os grupos, mas optou-se por colocá-los no mesmo gráfico, representante das condutas que abastecem o primeiro grupo, por apresentarem assentamentos de grandezas e evolução similares a este.

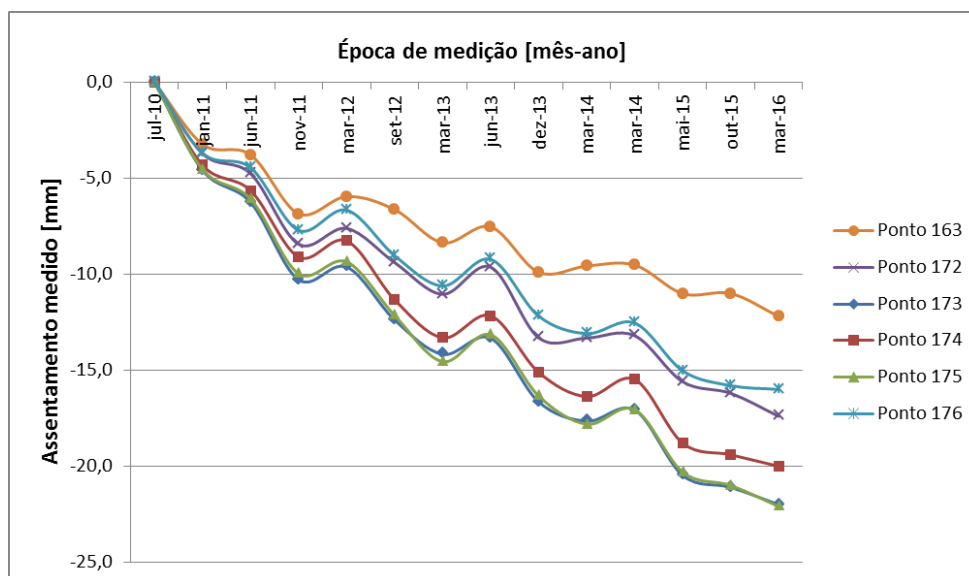


Figura 5.6- Ordenação dos assentamentos nos pontos das condutas que abastecem o Grupo 1, obtidos através dos levantamentos topográficos

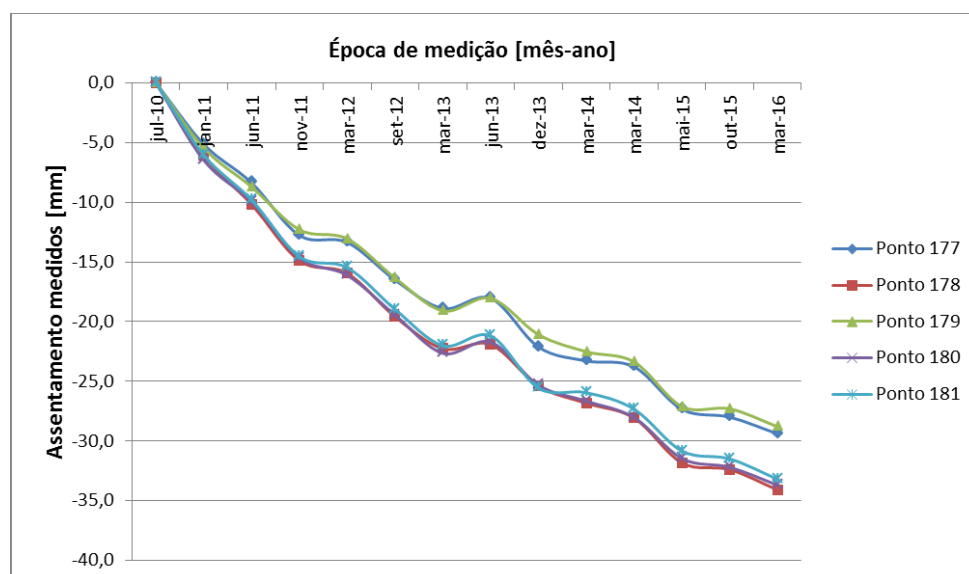


Figura 5.7- Ordenação dos assentamentos nos pontos das condutas que abastecem o Grupo 2, obtidos através dos levantamentos topográficos

A observação dos gráficos realçou três épocas de medição com uma perturbação de valores superior, que foram suprimidas, para obter uma curva de assentamentos mais regular e ser possível usá-la na estimativa dos assentamentos nos anos seguintes. As épocas em questão foram a 2.1, 5.1 e 7, correspondentes a Novembro de 2011, Junho de 2013 e Março de 2014, respetivamente, e conduziram aos gráficos apresentados na figura 5.8 e 5.9.

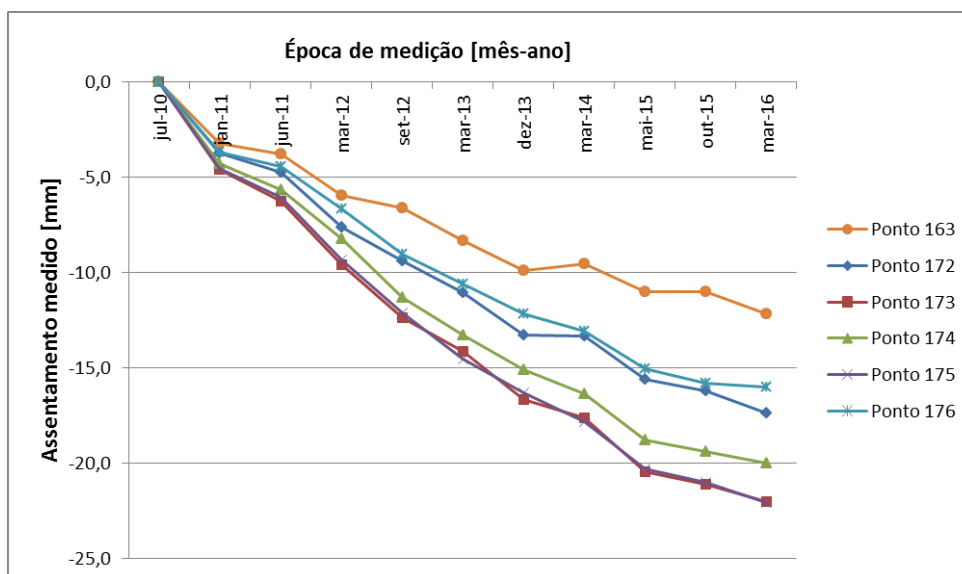


Figura 5.8 - Curva (final) dos assentamentos medidos de Julho de 2010 até Março de 2016, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 1

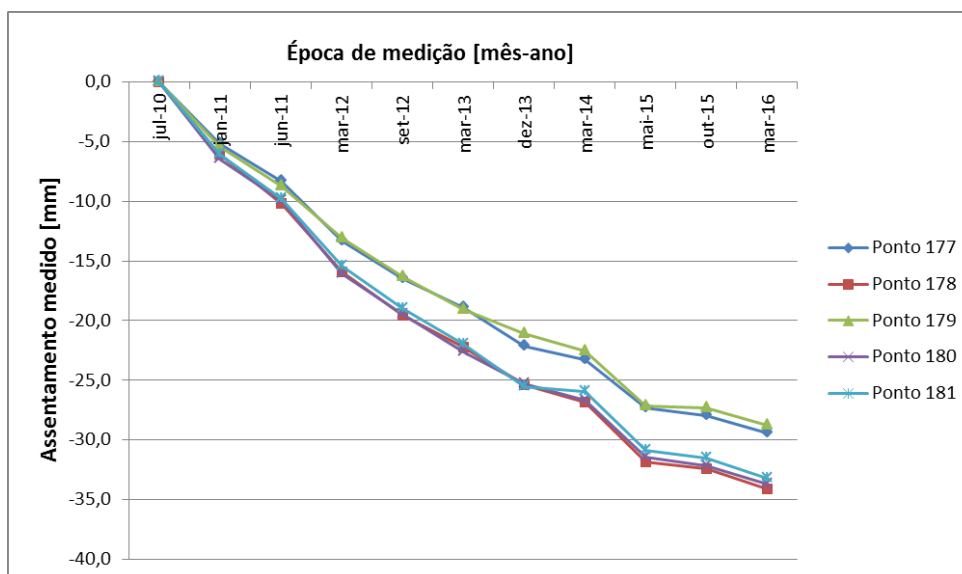


Figura 5.9 - Curva (final) dos assentamentos medidos de Julho de 2010 até Março de 2016, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 2

5.3. MÉTODO UTILIZADO NA ESTIMATIVA DOS ASSENTAMENTOS

Em primeira análise ao objetivo deste trabalho, estimar os assentamentos nas condutas do circuito de águas de refrigeração até ao fim da vida útil da Central de Lares, deparou-se com a falta de diversos dados necessários à estimativa através de consulta bibliográfica.

Essencialmente, não foram realizados ensaios edométricos em amostras de solo recolhidos na área da obra, que permitiriam obter as suas características de compressibilidade e, respetivamente ao tamanho

dos aluviões, existe a informação de que há uma grande variabilidade da sua espessura ao longo do terreno, sendo por isso dificultado o cálculo dos assentamentos recorrendo a equações da teoria da consolidação.

Na presença dos valores dos desníveis ocorridos em diversos pontos das condutas do CAR provenientes dos levantamentos topográficos e, uma vez que os maciços de ancoragem nas mudanças de direção se encontram sob fundação direta, ou seja, acompanham o solo durante o processo de consolidação, decidiu-se realizar a estimativa da evolução do restante processo através destes.

5.3.1. IDENTIFICAÇÃO DA FASE DA CONSOLIDAÇÃO EM QUE O SOLO SE ENCONTRA

Previamente à realização da estimativa dos assentamentos foi necessário identificar em que fase do processo de consolidação é que o solo de fundação da Central de Lares se encontra. Com esse objetivo, recorreu-se à teoria acerca dos solos moles, nomeadamente às informações sobre as aluviões do Baixo Mondego e correspondente reação ao carregamento, apresentadas no capítulo 2 e 3.

O início das deformações volumétricas ocorridas na Central deu-se aquando da construção do aterro que elevou a cota de projeto para 7 metros, previamente à construção das estruturas, que se estima ter sido em 2008.

Os assentamentos registados nos levantamentos topográficos, naturalmente, já não incluem os assentamentos imediatos ocorridos no solo e, olhando para o tempo decorrido desde 2008 até à última época de medições, cerca de 8 anos, estimou-se que o processo de rearranjo do esqueleto sólido tenha sido, também, realizado.

Observando a curva de assentamentos já ocorridos, nas figuras 5.10 e 5.11, e recordando a elevada quantidade de matéria orgânica presente nos solos encontrados naquela zona, depreendeu-se que, atualmente, o solo se encontra em fase de fluência, ou seja, em consolidação secundária.

5.3.2. DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DO ASSENTAMENTO POR CONSOLIDAÇÃO SECUNDÁRIA

Admitindo que o solo se encontra na fase final do processo de consolidação, o passo seguinte passou por analisar a expressão do assentamento correspondente à fluência num solo argiloso, e tentar perceber como seria possível colmatar a escassez de dados possuídos.

Apresenta-se de seguida a referida equação do assentamento secundário e o significado das respetivas parcelas:

$$s_d = \frac{h}{1+e} C_\alpha \log \frac{t_2}{t_1} \quad (5.1)$$

na qual h corresponde à espessura do estrato de argila, e ao índice de vazios do solo, C_α é o chamado *coeficiente de consolidação secundária*, t_2 é o instante em que se pretende conhecer o assentamento e t_1 o instante em que ocorreu o fim da consolidação primária.

O coeficiente de consolidação secundária consiste num parâmetro adimensional, que é obtido a partir de ensaios edométricos, nos quais as cargas são impostas na amostra durante um período de tempo muito longo, e representa uma constante que caracteriza o solo. Importa referir que a razão $h/(1+e)$,

presente na equação 5.1, é, também, constante ao longo do processo de consolidação, dedução demonstrada por Matos Fernandes no seu trabalho sobre Mecânica dos Solos, no anexo A4.1 (Matos Fernandes, 2012).

Concluindo, as únicas parcelas da equação da consolidação secundária que variam durante a fluência do esqueleto sólido do solo são as respeitantes ao tempo, nomeadamente t_1 e t_2 , o que permitiu reescrever esta expressão, como apresentada em 5.2, considerando apenas uma constante “K”, igual a $(h/(1+e)) \times C_\alpha$.

$$s_d = K \log \frac{t_2}{t_1} \quad (5.2)$$

Importa realçar o facto de a equação 5.1 ser válida apenas para uma camada de argila de espessura (h) uniforme, situação um pouco diferente da presente no caso de estudo, uma vez que existem vários tipos de solos moles, inclusive de espessura bastante variável ao longo do terreno. Por isso, os resultados apresentados neste capítulo, nomeadamente o valor de “K” e os respetivos assentamentos, apresentam um determinado valor de erro, que foi tido em conta nas conclusões alcançadas.

Regressando aos valores dos assentamentos já ocorridos, e admitindo que nas medições mais recentes o solo se encontrava na fase de fluência do esqueleto sólido do solo, a informação que não foi possível obter foi o instante, a partir da qual se passou da consolidação primária para a consolidação secundária, correspondente a t_1 .

Com base na equação 5.2 e resolvendo-a em ordem a “K”, obteve-se a expressão 5.3. Usando os valores obtidos nos levantamentos topográficos e as respetivas datas das épocas de medição, expostos na Figura 5.7, procedeu-se a várias simulações até se obter um valor constante de “K”.

$$K = s_d \div \log \frac{t_2}{t_1} \quad (5.3)$$

5.4. ESTIMATIVA DO INSTANTE CORRESPONDENTE AO FIM DA CONSOLIDAÇÃO PRIMÁRIA E DA CONSTANTE “K”

Em cada simulação, o procedimento consistiu em considerar cada época de medição como o fim da consolidação primária, ou seja, admitindo o instante t_1 igual a cada época. Foi, de seguida, calculado o valor de “K” entre cada uma das épocas seguintes, verificando a constância, ou não, de valores.

A simulação que permitiu obter um valor de “K” persistente ao longo de todas as épocas consideradas em fase de consolidação secundária, e em todos os pontos de medição, indicou que o valor do instante de t_1 foi admitido corretamente, uma vez que é unicamente durante essa fase do processo de consolidação que aquela constante é aplicável. Foi a partir deste raciocínio que surgiu a equação 5.3, e se colmatou a falta de dados necessários para determinar as parcelas desta constante, do modo descrito bibliograficamente.

Nas diversas simulações realizadas as variáveis que foram usadas na equação referida tiveram valores diferentes, referentes a cada época estudada, e determinaram-se da seguinte forma:

- O valor de S_d que se usou, naturalmente, foi o valor de assentamento respetivo a cada época;
- O instante t_1 , constante durante cada uma das simulações, foi calculado a partir da razão entre a época considerada como início da consolidação secundária e o fim da construção da Central;
- O instante t_2 , foi obtido através da diferença entre cada época alvo de estudo, em cada simulação do valor “K”, e o fim da construção da Central.

É importante referir que se considerou o início de todo o processo de consolidação como a data em que ocorreu o fim da construção da Central, uma vez que não se sabia a data exata em que se procedeu à colocação do aterro que subiu a cota de projeto. Admitiu-se deste modo, nos cálculos, que esta fase tenha ocorrido em Janeiro de 2008.

Ainda relativamente às variáveis referentes ao tempo, considerando que as informações expostas nos relatórios das campanhas topográficas referem o mês, mas não o dia em que estas foram realizadas, o cálculo de cada razão foi feito em relação ao primeiro dia de cada mês, considerado em cada uma das épocas estudadas.

Quanto às unidades usadas durante estes cálculos, tendo em conta que o objetivo em cada simulação foi apenas encontrar o ponto de início da consolidação secundária, não foram muito relevantes e, por isso, foram utilizados os assentamentos em mm e os instantes em dias, para facilitar o cálculo de cada razão no programa Excel.

5.4.1. PRIMEIRA SIMULAÇÃO, CONSIDERANDO O INSTANTE t_1 COINCIDENTE COM A ÉPOCA 0

Na primeira simulação realizada, foi testada a hipótese de a época 0, em Julho de 2010, ter sido correspondente ao início da consolidação secundária. Por isso, para o instante t_1 , considerando que foram usados os dias decorridos entre o fim da construção da Central e a época testada, o valor usado foi de 912 dias.

Apresentam-se na Tabela 5.4 as datas referentes aos acontecimentos que foram considerados nesta simulação de “K”, enquanto na Tabela 5.5 se apresentam os valores das variáveis respetivas ao tempo, instante t_1 e t_2 , em dias, referentes a cada época de medição posterior à considerada como início da consolidação secundária.

Tabela 5.4 - Datas referentes aos acontecimentos considerados na primeira simulação de “K”

Acontecimento	Data (mês e ano)
Fim da construção da obra	Janeiro 2008
Início da consolidação secundária	Julho 2010

Tabela 5.5 - Valores das variáveis respetivas ao tempo, usados na primeira simulação de “K”, referentes a cada época de medição

Variável	Valor adotado [dias]
Instante t_1	912
Instante t_2	Tempo decorrido desde Janeiro de 2008 até à época alvo de estudo

Os resultados obtidos nos cálculos da constante “K”, em cada uma das épocas posteriores a Julho de 2010, nos pontos das condutas do CAR sujeitos a análise, encontram-se expostos na Tabela 5.6. Esta tabela foi retirada do programa Excel e, é de salientar, que os valores usados no assentamento (s_d) foram positivos, no intuito de facilitar a comparação dos resultados.

Tabela 5.6- Resultados dos cálculos da constante “K” na primeira simulação, em cada época de medição dos assentamentos, nos pontos das condutas do CAR

Nº Ponto	época 0		época 1		época 2		época 3		época 4		época 5		época 6		época 6.1		época 8		época 9		época 10	
	sd	sd	K	sd	K	sd	K	sd	K	sd	K	sd	K	sd	K	sd	K	sd	K	sd	K	
163	0,0	3,2	40,47	3,8	27,82	6,0	26,79	6,6	24,40	8,4	26,49	9,9	26,42	9,6	24,39	11,0	23,54	11,0	22,37	12,2	23,71	
172	0,0	3,7	46,61	4,8	35,03	7,6	34,26	9,4	34,56	11,0	34,99	13,3	35,53	13,3	33,95	15,6	33,36	16,2	32,94	17,4	33,82	
173	0,0	4,6	57,51	6,3	46,07	9,6	43,31	12,4	45,56	14,2	44,91	16,7	44,44	17,7	44,98	20,5	43,79	21,1	42,90	22,0	42,76	
174	0,0	4,3	54,12	5,6	41,51	8,3	37,18	11,3	41,70	13,3	42,18	15,1	40,33	16,4	41,72	18,8	40,20	19,4	39,45	20,0	38,87	
175	0,0	4,5	56,88	6,1	44,75	9,4	42,09	12,1	44,71	14,6	46,11	16,3	43,61	17,8	45,39	20,3	43,43	21,0	42,70	22,1	42,95	
176	0,0	3,7	46,23	4,5	32,75	6,7	29,98	9,0	33,23	10,6	33,62	12,2	32,51	13,1	33,36	15,0	32,14	15,8	32,13	16,0	31,10	
177	0,0	5,2	64,52	8,4	61,60	13,4	60,19	16,5	60,76	18,9	59,90	22,1	59,07	23,3	59,36	27,4	58,48	28,0	56,93	29,4	57,14	
178	0,0	6,1	76,30	10,2	75,00	16,0	71,80	19,6	72,09	22,3	70,54	25,4	67,77	26,8	68,38	31,8	68,08	32,4	65,88	34,1	66,28	
179	0,0	5,5	68,41	8,7	64,10	13,1	58,79	16,3	60,17	19,1	60,50	21,1	56,29	22,5	57,39	27,1	57,99	27,3	55,51	28,8	55,98	
180	0,0	6,5	81,19	10,0	73,45	16,1	72,57	19,4	71,58	22,7	71,78	25,3	67,61	26,7	67,94	31,5	67,29	32,2	65,47	33,7	65,50	
181	0,0	6,0	75,67	9,8	72,20	15,5	69,69	19,0	69,81	22,0	69,75	25,6	68,25	26,0	66,13	30,8	65,95	31,5	64,05	33,2	64,53	
Dias após Jan-08	912		1096		1247		1521		1705		1886		2161		2251		2677		2830		2982	

De modo a evidenciar o processo de obtenção de cada um dos valores de “K”, apresenta-se na figura 5.10, retirada do Excel, cada passo desenvolvido até chegar ao valor de K= 40.47. Este valor é respeitante ao cálculo no ponto de medição 163, e ao assentamento ocorrido entre a época 0 e a época 1.

O valor do instante t_2 , considerado neste caso, foi o correspondente aos dias decorridos desde o fim da construção da obra até à época de medição 1, ou seja, desde Janeiro de 2008 até Janeiro de 2011.

Época 1	
$K = Sd \div \log \frac{t_2}{t_1} = 3,2 \div \log \frac{1096}{912} = 40,47$	
$Sd = Sd(\text{época 1}) - Sd(\text{época 0})$	3,2 mm
$t_2 = \text{Jan11} - \text{Jan08}$	1096 dias
$t_1 = \text{Jul10} - \text{Jan08}$	912 dias

Figura 5.10 - Valores das variáveis usadas na obtenção da constante “K” e respetivo cálculo, para a época 1

Analisando os resultados obtidos, verificou-se que, para cada ponto de medição, não há constância nos valores da constante “K”. Serve a Figura 5.11 para mostrar de forma mais nítida esta evolução dos resultados.

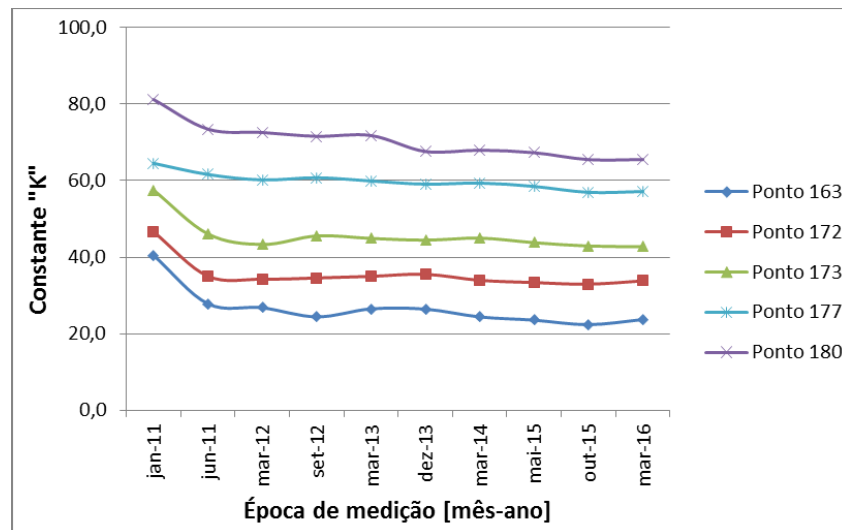


Figura 5.11- Gráfico no qual se representam os valores da constante “K” em alguns pontos de medição das condutas CAR, para cada uma das épocas de medição, obtidos usando t_1 correspondente a Julho de 2010

Nesta figura, onde se apresenta a evolução dos valores de “K” em alguns pontos de medição, por exemplo no ponto 163, verificou-se que desde a primeira época até à época número 2 ocorreu um decréscimo de mais de 13 unidades. Depreende-se, deste modo, que em Julho de 2010 ainda estavam a ocorrer assentamentos por consolidação primária.

Importa referir, que no gráfico apresentado, se colocou as datas referentes às épocas de medições no eixo do tempo, conduzindo à perda de algum rigor, pois as épocas de medição não apresentam igual intervalo de tempo entre elas. Considerando que os presentes dados servem apenas para termos representativos, optou-se por esta solução por ser mais facilmente perceptível a que corresponde cada valor apresentado.

5.4.2. SEGUNDA SIMULAÇÃO, CONSIDERANDO O INSTANTE T_1 COINCIDENTE COM A ÉPOCA 1

Na segunda simulação procedeu-se do mesmo modo que na anterior, apenas mudando a variável t_1 e a variável respetiva ao assentamento. Neste caso o instante t_1 tomou o valor corresponde aos dias decorridos desde o início do processo de consolidação (Janeiro de 2008) até Janeiro de 2011, resultando num valor igual a 1096,

Uma vez que no caso presente se considerou que foi na época 1 que se iniciou a fase de consolidação secundária do solo, foi necessário calcular os valores de assentamentos que ocorreram apenas durante esta fase. Por isso, retirou-se a todos os assentamentos, o assentamento verificado entre a época 0 e a época 1, resultando nos valores apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7- Resultados dos cálculos do novo assentamento secundário correspondente a cada época de medição

Nº Ponto	época 0		época 1		época 2		época 3		época 4		época 5		época 6		época 6.1		época 8		época 9		época 10	
	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]
163			3,2	0,0	3,8	0,5	6,0	2,7	6,6	3,4	8,4	5,1	9,9	6,7	9,6	6,3	11,0	7,8	11,0	7,8	12,2	9,0
172			3,7	0,0	4,8	1,0	7,6	3,9	9,4	5,7	11,0	7,3	13,3	9,6	13,3	9,6	15,6	11,9	16,2	12,5	17,4	13,7
173			4,6	0,0	6,3	1,7	9,6	5,0	12,4	7,8	14,2	9,6	16,7	12,1	17,7	13,1	20,5	15,9	21,1	16,5	22,0	17,4
174			4,3	0,0	5,6	1,3	8,3	3,9	11,3	7,0	13,3	9,0	15,1	10,8	16,4	12,1	18,8	14,5	19,4	15,1	20,0	15,7
175			4,5	0,0	6,1	1,5	9,4	4,8	12,1	7,6	14,6	10,0	16,3	11,8	17,8	13,3	20,3	15,8	21,0	16,5	22,1	17,6
176			3,7	0,0	4,5	0,8	6,7	3,0	9,0	5,3	10,6	6,9	12,2	8,5	13,1	9,4	15,0	11,3	15,8	12,1	16,0	12,3
177			5,2	0,0	8,4	3,2	13,4	8,2	16,5	11,4	18,9	13,8	22,1	17,0	23,3	18,1	27,4	22,2	28,0	22,8	29,4	24,2
178			6,1	0,0	10,2	4,1	16,0	9,9	19,6	13,5	22,3	16,2	25,4	19,3	26,8	20,7	31,8	25,8	32,4	26,3	34,1	28,0
179			5,5	0,0	8,7	3,2	13,1	7,6	16,3	10,9	19,1	13,6	21,1	15,6	22,5	17,1	27,1	21,7	27,3	21,8	28,8	23,3
180			6,5	0,0	10,0	3,5	16,1	9,6	19,4	13,0	22,7	16,2	25,3	18,9	26,7	20,2	31,5	25,0	32,2	25,7	33,7	27,2
181			6,0	0,0	9,8	3,8	15,5	9,4	19,0	12,9	22,0	16,0	25,6	19,5	26,0	19,9	30,8	24,8	31,5	25,5	33,2	27,2

Apresentam-se na Tabela 5.8 as datas referentes aos acontecimentos considerados na segunda simulação de “K”, e na Tabela 5.9 os valores das variáveis respetivas ao tempo, instante t_1 e t_2 , em dias, referentes a cada época de medição posterior a Janeiro de 2011.

Tabela 5.8 - Datas referentes aos acontecimentos considerados na segunda simulação de “K”

Acontecimento	Data (mês e ano)
Fim da construção da obra	Janeiro 2008
Início da consolidação secundária	Janeiro 2011

Tabela 5.9 - Valores das variáveis respetivas ao tempo, usados na segunda simulação de “K”, referentes a cada época de medição

Variável	Valor adotado [dias]
Instante t_1	1096
Instante t_2	Tempo decorrido desde Janeiro de 2008 até à época alvo de estudo

Na Tabelas 5.10 e Figura 5.12, apresentam-se os resultados obtidos assim como a evolução dos valores de “K” durante as épocas de medição.

Tabela 5.10 Resultados dos cálculos da constante “K” na segunda simulação, em cada época de medições dos assentamentos, nos pontos das condutas do CAR

Nº Ponto	época 0 dif [mm]	época 1 dif [mm]	época 2 dif [mm]	K	época 3 dif [mm]	K	época 4 dif [mm]	K	época 5 dif [mm]	K	época 6 dif [mm]	K	época 6.1 dif [mm]	K	época 8 dif [mm]	K	época 9 dif [mm]	K	época 10 dif [mm]	K
163		0,0	0,5	9,81	2,7	19,11	3,4	17,72	5,1	21,76	6,7	22,62	6,3	20,28	7,8	20,06	7,8	18,86	9,0	20,64
172		0,0	1,0	18,55	3,9	27,33	5,7	29,54	7,3	31,05	9,6	32,53	9,6	30,71	11,9	30,63	12,5	30,29	13,7	31,47
173		0,0	1,7	29,79	5,0	35,34	7,8	40,59	9,6	40,64	12,1	40,90	13,1	41,78	15,9	40,97	16,5	40,08	17,4	40,05
174		0,0	1,3	23,55	3,9	27,68	7,0	36,53	9,0	38,14	10,8	36,60	12,1	38,55	14,5	37,34	15,1	36,60	15,7	36,07
175		0,0	1,5	27,47	4,8	33,80	7,6	39,65	10,0	42,46	11,8	40,02	13,3	42,46	15,8	40,66	16,5	39,95	17,6	40,40
176		0,0	0,8	13,56	3,0	20,87	5,3	27,82	6,9	29,36	8,5	28,79	9,4	30,07	11,3	29,24	12,1	29,39	12,3	28,32
177		0,0	3,2	57,44	8,2	57,76	11,4	59,19	13,8	58,33	17,0	57,59	18,1	58,04	22,2	57,24	22,8	55,46	24,2	55,79
178		0,0	4,1	73,14	9,9	69,28	13,5	70,34	16,2	68,60	19,3	65,46	20,7	66,35	25,8	66,39	26,3	63,86	28,0	64,44
179		0,0	3,2	57,98	7,6	53,40	10,9	56,74	13,6	57,82	15,6	53,01	17,1	54,58	21,7	55,85	21,8	53,01	23,3	53,69
180		0,0	3,5	62,44	9,6	67,74	13,0	67,58	16,2	68,60	18,9	63,93	20,2	64,56	25,0	64,43	25,7	62,43	27,2	62,62
181		0,0	3,8	67,25	9,4	66,33	12,9	67,37	16,0	67,75	19,5	66,24	19,9	63,70	24,8	63,94	25,5	61,80	27,2	62,48
Dias após Jan-08	912	1096	1247		1521		1705		1886		2161		2251		2677		2830		2982	

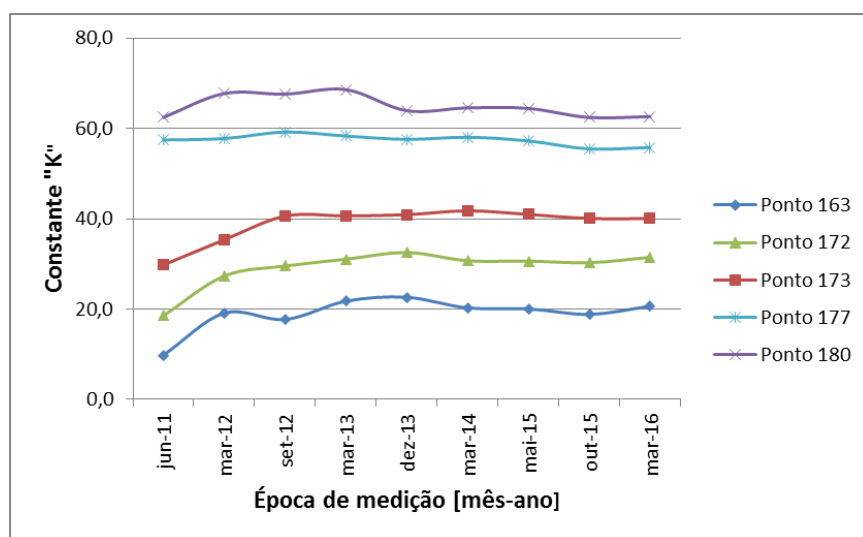


Figura 5.12- Representação gráfica, na qual se representam os valores da constante “K” em alguns pontos de medição das condutas do CAR, para cada uma das épocas de medição, obtidos usando t_1 correspondente a Janeiro de 2011

Mais uma vez, os valores da constante “K” não se mostraram persistentes ao longo das várias épocas, num mesmo ponto de medição. Por isso, durante a época 1 a consolidação secundária ainda não se tinha iniciado e foi necessário prosseguir com as simulações.

5.4.3. TERCEIRA SIMULAÇÃO, CONSIDERANDO O INSTANTE T_1 COINCIDENTE COM A ÉPOCA 2

Na terceira simulação da constante “K” as condições gerais mantiveram-se e, sendo que neste caso se testou a hipótese de a época 2 coincidir com o início do processo de consolidação secundária, o instante t_1 correspondeu ao valor de 1247 dias.

O assentamento ocorrido devido à consolidação secundária, considerado nesta simulação, teve que ser novamente reformulado, retirando o valor do assentamento ocorrido até à época 2 e resultando nos valores apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Resultados dos cálculos do novo assentamento secundário correspondente a cada época de medição

Nº Ponto	época 0		época 1		época 2		época 3		época 4		época 5		época 6		época 6.1		época 8		época 9		época 10	
	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]	sd	dif [mm]
163					3,8	0,0	6,0	2,2	6,6	2,8	8,4	4,6	9,9	6,1	9,6	5,8	11,0	7,2	11,0	7,2	12,2	8,4
172					4,8	0,0	7,6	2,8	9,4	4,6	11,0	6,3	13,3	8,6	13,3	8,6	15,6	10,8	16,2	11,4	17,4	12,6
173					6,3	0,0	9,6	3,4	12,4	6,1	14,2	7,9	16,7	10,4	17,7	11,4	20,5	14,2	21,1	14,8	22,0	15,7
174					5,6	0,0	8,3	2,6	11,3	5,7	13,3	7,7	15,1	9,5	16,4	10,7	18,8	13,2	19,4	13,8	20,0	14,4
175					6,1	0,0	9,4	3,3	12,1	6,1	14,6	8,5	16,3	10,3	17,8	11,7	20,3	14,2	21,0	14,9	22,1	16,0
176					4,5	0,0	6,7	2,2	9,0	4,6	10,6	6,2	12,2	7,7	13,1	8,6	15,0	10,6	15,8	11,3	16,0	11,5
177					8,4	0,0	13,4	5,0	16,5	8,1	18,9	10,5	22,1	13,8	23,3	14,9	27,4	19,0	28,0	19,6	29,4	21,0
178					10,2	0,0	16,0	5,8	19,6	9,4	22,3	12,1	25,4	15,2	26,8	16,6	31,8	21,7	32,4	22,2	34,1	23,9
179					8,7	0,0	13,1	4,4	16,3	7,6	19,1	10,4	21,1	12,4	22,5	13,8	27,1	18,4	27,3	18,6	28,8	20,1
180					10,0	0,0	16,1	6,1	19,4	9,5	22,7	12,7	25,3	15,4	26,7	16,7	31,5	21,5	32,2	22,2	33,7	23,7
181					9,8	0,0	15,5	5,7	19,0	9,2	22,0	12,2	25,6	15,8	26,0	16,1	30,8	21,0	31,5	21,7	33,2	23,4

Nas Tabelas 5.12 e 5.13, expõem-se as datas alusivas aos acontecimentos considerados na terceira simulação de “K” e os valores das variáveis respetivas ao tempo, instante t_1 e t_2 , em dias, referentes a cada época de medição posterior a Junho de 2011, respetivamente.

Tabela 5.12 - Datas referentes aos acontecimentos considerados na terceira simulação de “K”

Acontecimento	Data (mês e ano)
Fim da construção da obra	Janeiro 2008
Início da consolidação secundária	Junho 2011

Tabela 5.13 - Valores das variáveis respetivas ao tempo, usados na terceira simulação de “K”, referentes a cada época de medição

Variável	Valor adotado [dias]
Instante t_1	1247 [dias]
Instante t_2	Tempo decorrido desde Janeiro de 2008 até à época alvo de estudo

Apresentam-se na Tabela 5.14 e Figura 5.13 os resultados obtidos nos cálculos de “K” assim como a evolução dos valores de “K” durante as épocas de medição, sob a forma de tabela e gráfico.

Tabela 5.14- Resultados dos cálculos da constante “K” na terceira simulação, em cada época de medições dos assentamentos, nos pontos das condutas do CAR

Nº Ponto	época 0 dif [mm]	época 1 dif [mm]	época 2 dif [mm]	época 3 dif [mm]	K	época 4 dif [mm]	K	época 5 dif [mm]	K	época 6 dif [mm]	K	época 6.1 dif [mm]	K	época 8 dif [mm]	K	época 9 dif [mm]	K	época 10 dif [mm]	K
163			0,0	2,2	25,16	2,8	20,98	4,6	25,49	6,1	25,63	5,8	22,57	7,2	21,79	7,2	20,29	8,4	22,24
172			0,0	2,8	33,04	4,6	34,08	6,3	34,95	8,6	35,81	8,6	33,37	10,8	32,67	11,4	32,14	12,6	33,38
173			0,0	3,4	38,95	6,1	45,05	7,9	44,02	10,4	43,51	11,4	44,40	14,2	42,86	14,8	41,69	15,7	41,57
174			0,0	2,6	30,37	5,7	41,88	7,7	42,69	9,5	39,66	10,7	41,83	13,2	39,66	13,8	38,66	14,4	37,93
175			0,0	3,3	37,91	6,1	44,68	8,5	47,14	10,3	42,97	11,7	45,73	14,2	42,89	14,9	41,92	16,0	42,31
176			0,0	2,2	25,62	4,6	33,71	6,2	34,28	7,7	32,37	8,6	33,68	10,6	31,89	11,3	31,89	11,5	30,50
177			0,0	5,0	57,96	8,1	59,92	10,5	58,61	13,8	57,62	14,9	58,17	19,0	57,21	19,6	55,15	21,0	55,54
178			0,0	5,8	66,77	9,4	69,19	12,1	67,18	15,2	63,65	16,6	64,87	21,7	65,25	22,2	62,40	23,9	63,15
179			0,0	4,4	50,43	7,6	56,24	10,4	57,77	12,4	51,85	13,8	53,84	18,4	55,49	18,6	52,23	20,1	53,06
180			0,0	6,1	71,18	9,5	69,71	12,7	70,52	15,4	64,28	16,7	65,03	21,5	64,77	22,2	62,43	23,7	62,65
181			0,0	5,7	65,73	9,2	67,42	12,2	67,90	15,8	66,00	16,1	62,92	21,0	63,39	21,7	60,94	23,4	61,77
Dias após Jan-08	912	1096	1247	1521		1705		1886		2161		2251		2677		2830		2982	

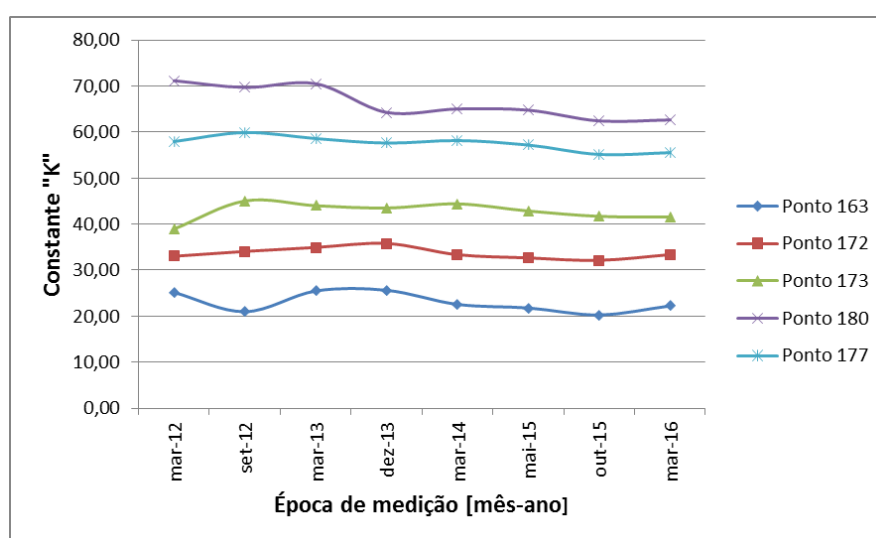


Figura 5.13 - Representação gráfica, na qual se representam os valores da constante “K” em alguns pontos da conduta CAR, em cada uma das épocas de medição, obtidos usando t_1 correspondente a Junho de 2011

Na análise desta última simulação, pôde verificar-se que os valores de “K”, num mesmo ponto de medição, se mantiveram no geral constantes, durante as épocas das campanhas de levantamentos, apresentando apenas uma variação nunca superior a um valor relativo de 10 unidades.

Estes resultados indicam que, durante o intervalo de tempo decorrido entre Junho de 2011 e Março de 2016, o solo de fundação já se encontrava em fase de consolidação devido à fluência do esqueleto sólido, ou seja, os assentamentos ocorreram devido à consolidação secundária.

Após as várias simulações realizadas, foi então viável admitir que a mudança entre a fase de consolidação primária e a secundária ocorreu aproximadamente em Junho de 2011, possibilitando proceder às estimativas dos restantes assentamentos, que ainda poderão ocorrer na obra da Central de Lares.

5.5. ESTIMATIVA DOS ASSENTAMENTOS NOS MACIÇOS DE APOIO DAS CONDUTAS DO CAR

5.5.1. ESTIMATIVA DO ASSENTAMENTO SECUNDÁRIO EM MARÇO DE 2040

A partir dos resultados das simulações realizadas, em particular da terceira, foi possível obter os dados necessários para realizar a estimativa dos assentamentos que poderão vir a ocorrer nas condutas do Circuito de Águas de Refrigeração. Considerando que este assentamento ocorre devido à consolidação secundária, recorreu-se à equação 5.2 para proceder ao seu cálculo, em cada ponto de medição.

Como referido anteriormente, o valor do instante t_1 usado foi o correspondente aos dias sucedidos desde o fim da construção da obra até Junho de 2011, enquanto no instante t_2 se utilizou os dias a decorrer até Março de 2040, uma vez que se pretendia obter o assentamento até ao fim da sua vida útil. Optou-se por realizar a estimativa relativamente a este mês dado que, foi recebida a informação de que as próximas medições topográficas serão realizadas em Março de cada ano e, por isso, se torna razoável comparar os valores referentes ao mesmo período.

Quanto ao valor da constante “K” usado, uma vez que se obtiveram vários resultados nos cálculos anteriormente apresentados, foram realizadas três estimativas diferentes dos assentamentos com um valor de “K” distinto, no intuito de comparar os resultados.

Apresentam-se na Tabela 5.15 as datas referentes aos acontecimentos considerados na estimativa do valor do assentamento secundário em Março de 2040, enquanto na Tabela 5.16 se encontram expostos os valores dos instantes t_1 e t_2 usados. Ambas as tabelas referem valores que se mantiveram constantes nas três estimativas efetuadas e, em todos os pontos de medição.

Tabela 5.15 - Datas referentes aos acontecimentos considerados na estimativa do assentamento secundário em Março de 2040

Acontecimento	Data (mês e ano)
Fim da construção da obra	Janeiro 2008
Início da consolidação secundária	Junho 2011

Tabela 5.16 - Valores das variáveis respetivas ao tempo, usados na estimativa do assentamento secundário em Março de 2040

Variável	Valor adotado [dias]
Instante t_1	1247
Instante t_2	11748

Na primeira estimativa, efetuou-se o cálculo do valor médio do conjunto de resultados da constante “K” obtidos em todas as épocas de campanha, em cada um dos pontos de medição, apresentados na Tabela 5.14.

Na estimativa seguinte, a constante “K” tomou o valor obtido na última época, em Março de 2016 e, na terceira, foi verificado qual o valor máximo de “K” de todas as épocas, em cada ponto de medição.

Com estes valores, e com as variáveis t_1 e t_2 expostas na Figura 5.14, estimaram-se os assentamentos secundários totais até 2040. Estes resultados encontram-se apresentados na Tabela 5.17, assim como os valores da constante “K” usados.

Tabela 5.17- Resultados da estimativa dos assentamentos secundários a ocorrer até Março de 2040

Nº Ponto	Estimativa com o valor médio de K		Estimativa com o último valor de K		Estimativa com o valor máximo de K	
	Média (K)	Sd Março 2040	Época 10 (K)	Sd Março 2040	Máx (K)	Sd Março 2040
		mm		mm		mm
163	23,02	22,4	22,24	21,7	25,63	25,0
172	33,68	32,8	33,38	32,5	35,81	34,9
173	42,76	41,7	41,57	40,5	45,05	43,9
174	39,09	38,1	37,93	36,9	42,69	41,6
175	43,19	42,1	42,31	41,2	47,14	45,9
176	31,74	30,9	30,50	29,7	34,28	33,4
177	57,52	56,0	55,54	54,1	59,92	58,4
178	65,31	63,6	63,15	61,5	69,19	67,4
179	53,86	52,5	53,06	51,7	57,77	56,3
180	66,32	64,6	62,65	61,0	71,18	69,3
181	64,51	62,8	61,77	60,2	67,90	66,1

De forma a expor o processo de cálculo dos assentamentos secundários em cada ponto, demonstra-se na Figura 5.13 o procedimento efetuado para obter o assentamento secundário que se estima ocorrer no ponto de medição 163, recorrendo à média de valores da constante “K”. Como se pode observar este cálculo resultou num valor de 22,4 milímetros.

Março de 2040	
$Sd = K \log \frac{t_2}{t_1} = 23,02 \times \log \frac{11748}{1247} = 22,4 \text{ mm}$	
K resultado da média de valores	23,02
$t_2 = \text{Mar40- Jan08}$	11748 dias
$t_1 = \text{Jun11-Jan08}$	1247 dias

Figura 5.14 - Valores das variáveis usadas na obtenção da constante “K” e respetivo cálculo, em Março de 2040

Observando todos os valores obtidos, verificou-se que até à última medição topográfica se desenvolveram cerca de metade dos assentamentos que se estimou ocorrer por consolidação secundária e, naturalmente, o assentamento superior verificou-se quando se efetuou a estimativa recorrendo ao maior valor da constante “K”.

5.5.2. ESTIMATIVA DO ASSENTAMENTO SECUNDÁRIO EM MARÇO DE CADA ANO

5.5.2.1. Resultados numéricos das estimativas

Para completar o estudo dos desníveis nas condutas do Circuito de Águas de Refrigeração, foi realizada a estimativa dos assentamentos secundários em Março de cada ano de vida útil da obra, ou seja até 2040.

Decidiu realizar-se estas estimativas de modo a obter a evolução dos assentamentos ao longo dos anos, para representá-los graficamente e poder compará-los, tanto aos valores já medidos como aos valores decorrentes de campanhas de levantamentos topográficos que serão realizadas no futuro. Por isso, tal como nos cálculos realizados anteriormente, foi escolhido o mês de Março por ser mais razoável em termos de comparação.

As estimativas, apresentadas da Tabela 5.18 à 5.20, foram efetuadas com base no mesmo raciocínio feito na estimativa realizada para o ano de 2040, ou seja, o processo usado foi o apresentado na Figura 5.13 e, a única variável neste último caso, foi a respeitante ao instante t_2 , que depende do ano considerado em cada cálculo.

Em relação ao valor da contante “K”, foi usado o valor máximo de cada ponto, por conduzir ao valor de assentamento superior.

Tabela 5.18- Estimativa do assentamento secundário, em Março de cada ano até 2016

Nº Ponto	Maior valor de K	Sd [mm] mar-12	Sd [mm] mar-13	Sd [mm] mar-14	Sd [mm] mar-15	Sd [mm] mar-16
163	25,63	2,2	4,6	6,6	8,2	9,7
172	35,81	3,1	6,4	9,2	11,5	13,6
173	45,05	3,9	8,1	11,6	14,5	17,1
174	42,69	3,7	7,7	10,9	13,7	16,2
175	47,14	4,1	8,5	12,1	15,2	17,8
176	34,28	3,0	6,2	8,8	11,0	13,0
177	59,92	5,2	10,8	15,4	19,3	22,7
178	69,19	6,0	12,4	17,7	22,3	26,2
179	57,77	5,0	10,4	14,8	18,6	21,9
180	71,18	6,1	12,8	18,3	22,9	27,0
181	67,90	5,9	12,2	17,4	21,8	25,7
t1 [dias]		1247	1247	1247	1247	1247
t2 [dias]		1521	1886	2251	2616	2982

Tabela 5.19- Estimativa do assentamento secundário, em Março de cada ano, desde 2017 até 2030

Nº Ponto	Sd [mm] mar-17	Sd [mm] mar-18	Sd [mm] mar-19	Sd [mm] mar-20	Sd [mm] mar-21	Sd [mm] mar-22	Sd [mm] mar-23	Sd [mm] mar-24	Sd [mm] mar-25	Sd [mm] mar-26	Sd [mm] mar-27	Sd [mm] mar-28	Sd [mm] mar-29	Sd [mm] mar-30
163	11,0	12,1	13,2	14,1	15,0	15,8	16,6	17,3	18,0	18,6	19,2	19,8	20,3	20,8
172	15,4	17,0	18,4	19,8	21,0	22,1	23,2	24,2	25,1	26,0	26,8	27,6	28,4	29,1
173	19,3	21,3	23,2	24,9	26,4	27,8	29,2	30,4	31,6	32,7	33,7	34,7	35,7	36,6
174	18,3	20,2	22,0	23,6	25,0	26,4	27,6	28,8	29,9	31,0	32,0	32,9	33,8	34,7
175	20,2	22,3	24,3	26,0	27,6	29,1	30,5	31,8	33,1	34,2	35,3	36,4	37,4	38,3
176	14,7	16,2	17,6	18,9	20,1	21,2	22,2	23,2	24,0	24,9	25,7	26,4	27,2	27,9
177	25,7	28,4	30,8	33,1	35,1	37,0	38,8	40,5	42,0	43,5	44,9	46,2	47,5	48,7
178	29,7	32,8	35,6	38,2	40,6	42,8	44,8	46,7	48,5	50,2	51,8	53,4	54,8	56,2
179	24,8	27,4	29,7	31,9	33,9	35,7	37,4	39,0	40,5	41,9	43,3	44,6	45,8	46,9
180	30,5	33,7	36,6	39,3	41,7	44,0	46,1	48,1	49,9	51,7	53,3	54,9	56,4	57,8
181	29,1	32,2	34,9	37,5	39,8	42,0	44,0	45,9	47,6	49,3	50,9	52,4	53,8	55,2
t1 [dias]	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247
t2 [dias]	3347	3712	4077	4443	4808	5173	5538	5904	6269	6634	6999	7365	7730	8095

Tabela 5.20- Estimativa do assentamento secundário, em Março de cada ano, desde 2031 até 2040

Nº Ponto	Sd [mm] mar-31	Sd [mm] mar-32	Sd [mm] mar-33	Sd [mm] mar-34	Sd [mm] mar-35	Sd [mm] mar-36	Sd [mm] mar-37	Sd [mm] mar-38	Sd [mm] mar-39	Sd [mm] mar-40
163	21,3	21,8	22,2	22,7	23,1	23,5	23,9	24,3	24,6	25,0
172	29,8	30,4	31,1	31,7	32,2	32,8	33,4	33,9	34,4	34,9
173	37,5	38,3	39,1	39,8	40,6	41,3	42,0	42,6	43,3	43,9
174	35,5	36,3	37,0	37,8	38,4	39,1	39,8	40,4	41,0	41,6
175	39,2	40,1	40,9	41,7	42,5	43,2	43,9	44,6	45,3	45,9
176	28,5	29,1	29,7	30,3	30,9	31,4	31,9	32,4	32,9	33,4
177	49,8	50,9	52,0	53,0	54,0	54,9	55,8	56,7	57,5	58,4
178	57,5	58,8	60,0	61,2	62,3	63,4	64,5	65,5	66,4	67,4
179	48,0	49,1	50,1	51,1	52,0	52,9	53,8	54,7	55,5	56,3
180	59,2	60,5	61,7	63,0	64,1	65,2	66,3	67,3	68,4	69,3
181	56,5	57,7	58,9	60,1	61,2	62,2	63,3	64,2	65,2	66,1
t1 [dias]	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247	1247
t2 [dias]	8460	8826	9191	9556	9921	10287	10652	11017	11382	11748

5.5.2.2. Resultados gráficos das estimativas

Os resultados das estimativas dos assentamentos secundários das condutas foram colocados sob a forma de gráficos de linhas de tendência, no intuito de se tornar mais fácil tirar conclusões acerca da sua evolução ao longo do tempo. Nas Figuras 5.15 e 5.16 apresenta-se a evolução dos assentamentos secundários até 2040, obtidos nos pontos de medição referidos em subcapítulos anteriores, que caracterizam as condutas que abastecem o grupo 1 e o grupo 2.

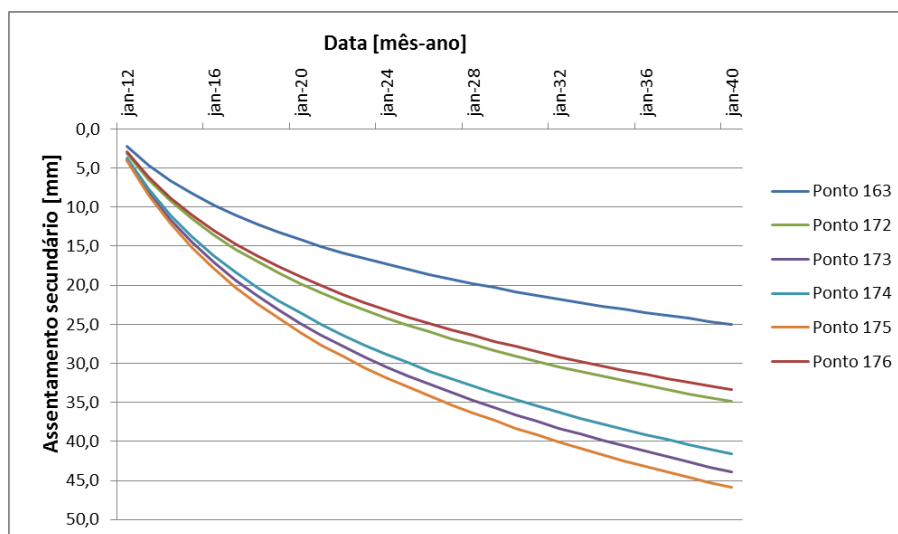


Figura 5.15 - Representação gráfica, sob a forma de linha de tendência, dos assentamentos secundários resultantes das estimativas até 2040, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 1

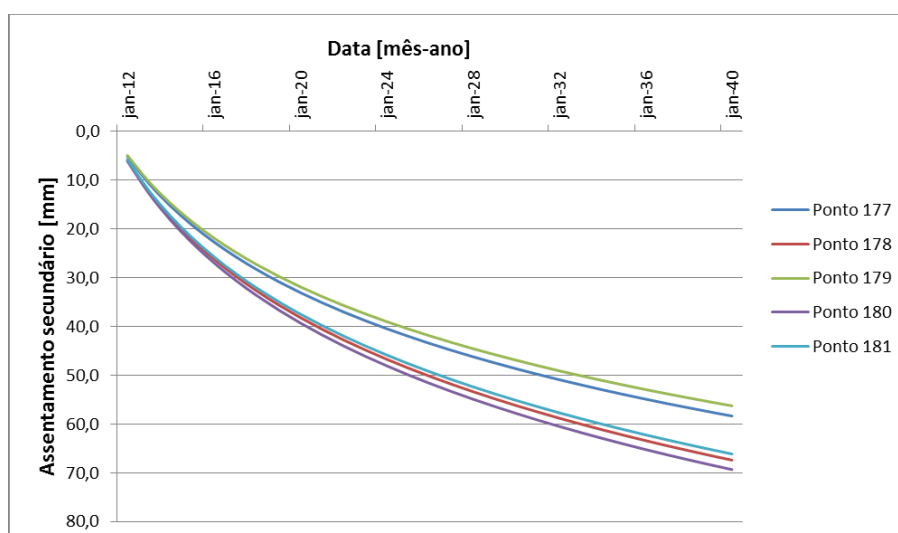


Figura 5.16 - Representação gráfica, sob a forma de linha de tendência, dos assentamentos secundários resultantes das estimativas até 2040, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 2

Para obter a representação gráfica do assentamento total a ocorrer no solo de fundação dos maciços do CAR, foi necessário realizar um prévio ajuste aos valores estimados. Realizou-se a soma de cada valor de assentamento secundário, obtido em 5.5.2.1, com o valor respetivo ao assentamento primário obtido nas campanhas de levantamentos topográficos, em cada ponto de medição.

Após o ajuste, foi realizada uma comparação entre os valores de assentamentos secundários medidos topograficamente e os obtidos nas estimativas, para ser possível verificar se estes últimos se encontram de acordo com os desníveis que têm vindo a ocorrer nos últimos anos. Esta comparação exibe-se na Figura 5.17, onde se representou os dados provenientes das campanhas de levantamentos topográficos com linhas a tracejado e, os resultados das estimativas recorrendo a linhas contínuas.

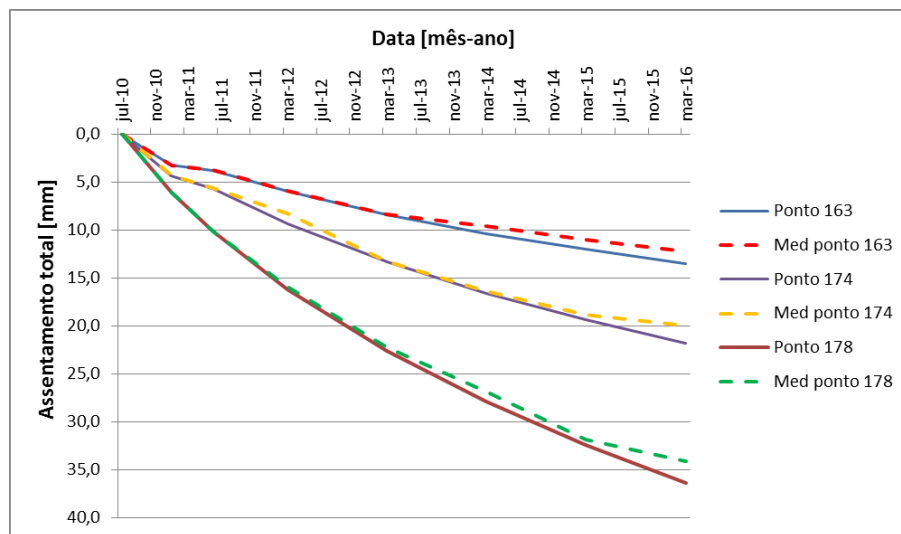


Figura 5.17 - Comparação de assentamentos secundários obtidos através de medições e através de estimativas, em alguns pontos das condutas do CAR

Quanto à escala temporal usada na representação gráfica, optou-se por usar espaçamentos de 4 meses, permitindo tirar conclusões corretamente. Pôde detetar-se, nomeadamente, uma pequena diferença de valores durante a evolução dos assentamentos.

Na realização dos gráficos de assentamentos totais até 2040, expostos nas Figuras 5.18 e 5.19, para além do ajuste feito aos valores provenientes das estimativas, foi também necessário incluir os dados referentes ao assentamento primário que ocorreu até Junho de 2011, viabilizando a representação da evolução completa de assentamentos nas condutas.

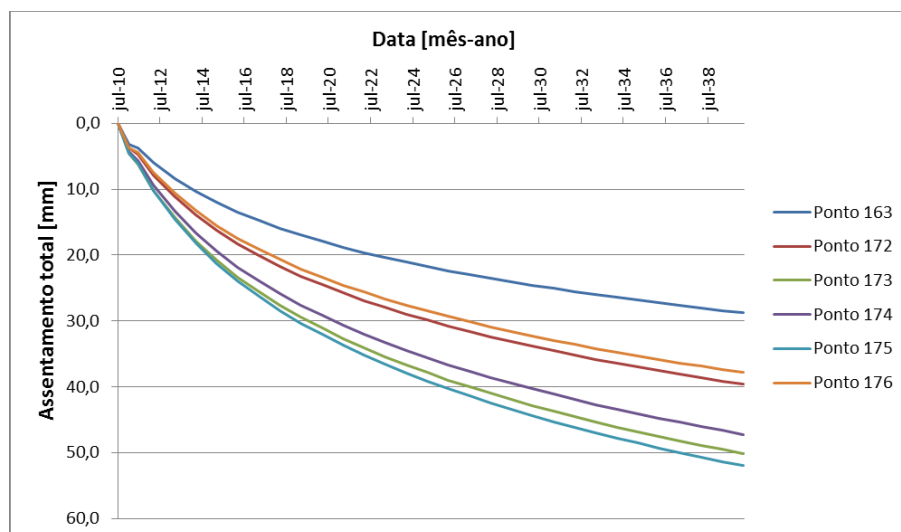


Figura 5.18 - Representação gráfica dos assentamentos totais até 2040, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 1

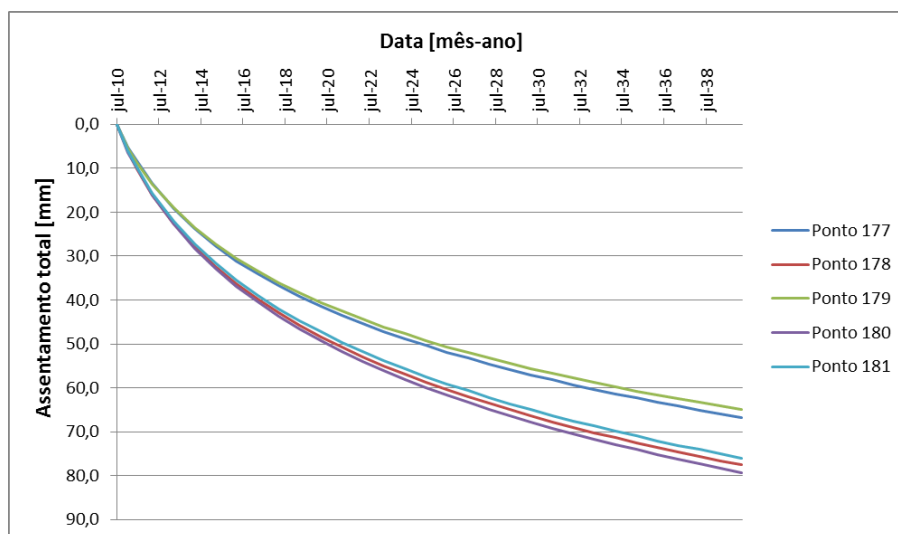


Figura 5.19 - Representação gráfica dos assentamentos totais até 2040, nos pontos das condutas que abastecem o grupo 2

Nas últimas representações gráficas recorreu-se a uma escala temporal diferente, usando espaçamentos de 2 anos, para ser exequível representar todos os assentamentos que se estima ocorrerem até 2040.

5.5.3. ASSENTAMENTO AINDA POR OCORRER

Nas estimativas dos assentamentos secundários foram calculados os valores a ocorrer desde o início da fase de fluência do esqueleto sólido do solo até ao fim da vida útil da obra, em Março de 2040.

Relembrando as roturas que ocorreram nas condutas que têm vindo a ser estudadas, foi mencionado que em discussão interna por parte da EDP a solução apresentada foi proceder a uma intervenção, colocando um dispositivo denominado de tubo-biela.

Este dispositivo, a intercalar nas condutas do circuito, será dimensionado para ter a capacidade de absorver os assentamentos que poderão vir a suceder-se. Portanto, para além do cálculo dos assentamentos que irão ocorrer após a última época de medições, importa também calcular os assentamentos que o tubo-biela terá que suportar.

Admitindo uma intervenção nas condutas em Março de 2018, foi estimado o valor de assentamento até esta data, recorrendo aos dados exibidos nas Tabelas 5.21 e 5.22. Estes valores foram posteriormente retirados aos assentamentos finais referentes a Março de 2040, resultando no exposto na coluna b) da Tabela 5.23.

Tabela 5.21 - Datas referentes aos acontecimentos considerados na estimativa do assentamento secundário em Março de 2018

Acontecimento	Data (mês e ano)
Fim da construção da obra	Janeiro 2008
Início da consolidação secundária	Junho 2011

Tabela 5.22 - Valores das variáveis respetivas ao tempo, usados na estimativa do assentamento secundário em Março de 2018

Variável	Valor adotado [dias]
Instante t_1	1247
Instante t_2	3712

Tabela 5.23- Cálculo do assentamento que pode vir a ocorrer nas condutas do CAR

Nº Ponto	Máx (K)	Sd Março 2040 mm	Sd a ocorrer após medições		Sd admitindo intervenção em 2018	
			Sd Março 2016 mm	a) mm	Sd Março 2018 mm	b) mm
163	25,63	25,0	8,42	17	12,14	13
172	35,81	34,9	12,64	22	16,96	18
173	45,05	43,9	15,74	28	21,34	23
174	42,69	41,6	14,36	27	20,22	21
175	47,14	45,9	16,02	30	22,33	24
176	34,28	33,4	11,55	22	16,24	17
177	59,92	58,4	21,03	37	28,38	30
178	69,19	67,4	23,91	43	32,78	35
179	57,77	56,3	20,09	36	27,37	29
180	71,18	69,3	23,72	46	33,72	36
181	67,90	66,1	23,39	43	32,17	34

Tabela 5.24- Significado das colunas a) e b), na representação apresentada na Tabela 5.23

a)	Sd (Março 2040) - Sd (Março 2016)
b)	Sd (Março 2040) - Sd (Março 2018)

Acerca dos resultados apresentados na Tabela 5.23, importa referir que a coluna em que são apresentados os valores de assentamento em Março de 2016 se encontra a cor diferente, para realçar o facto de estes serem provenientes das medições. Estes valores foram posteriormente retirados aos valores resultantes das estimativas em Março de 2040, obtendo-se deste modo os assentamentos que ainda poderão ocorrer no futuro, representados na coluna a).

Tal como nas estimativas realizadas para as representações gráficas, os valores da constante “K” escolhidos foram os maiores de cada ponto de medição. Com os resultados alcançados deste modo, foi possível obter o assentamento máximo que pode vir a ocorrer nas condutas e proceder ao dimensionamento adequado dos tubos-biela, tentando compensar a diferença de valores resultantes das considerações realizadas no início deste capítulo.

5.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS

Considerando o principal objetivo do presente capítulo, a estimativa da evolução dos assentamentos gerados no Circuito de Águas de Refrigeração foi bem-sucedida, uma vez que a partir dos dados provenientes das medições topográficas foi possível obter valores de assentamentos que poderão ocorrer até 2040.

Através do estudo dos desníveis medidos topograficamente, apresentado na Figura 5.3, verificou-se a grande diferença entre os assentamentos ocorridos nas áreas da obra fundadas sobre estacas e aqueles ocorridos nas zonas fundadas sob fundação direta, tendo apresentado variações da ordem dos 10mm.

Igualmente através dos assentamentos medidos, foi possível concluir que o solo de fundação dos maciços do CAR se encontra em fase de consolidação secundária e foi estimado o valor aproximado de dias ocorridos até ao início do assentamento nessa fase, e atribuído ao instante t_1 . O resultado conduziu à época de medição 2, em Junho de 2011, correspondente a 1247 dias após o fim da construção da Central.

Analisando os resultados obtidos nas estimativas dos assentamentos a ocorrer no futuro, particularmente os resultados numéricos e gráficos em 5.5.2.1 e 5.5.2.2, por permitirem uma análise mais pormenorizada, pôde observar-se aspetos que caracterizam o solo de fundação da Central.

Da análise dos resultados obtidos até 2040 foi possível visualizar que, efetivamente, este se encontra no depósito aluvionar do Baixo Mondego, com teor em matéria orgânica elevado, que conduz a assentamentos devido à consolidação secundária elevados. No caso presente do solo encontrado em Lares, estimou-se que ocorram assentamentos significativos com o evoluir do tempo, com maior eminência nas condutas que abastecem o Grupo 2 de funcionamento, concordantes com a elevada presença de formações aluvionares, como se pode observar na Figura 3.13.

Na Figura 5.15, foi avaliado se os assentamentos obtidos nos cálculos realizados foram similares aos assentamentos já ocorridos. Sendo que os resultados foram bastante próximos, e apenas no final da evolução se detetou uma diferença de cerca de 2 mm que poderá ser explicada pela margem de erro dos levantamentos topográficos ou do grau de erro das estimativas, pôde concluir-se que os resultados obtidos estão de acordo com os desníveis que têm vindo a suceder-se no solo de fundação.

Visto que, de várias formas, através dos resultados obtidos, se conseguiu observar comportamentos descritos bibliograficamente consequência do tipo de solo encontrado na Central de Lares e dos tipos de estruturas usadas na fundação, foi possível admitir que as estimativas, e os respetivos métodos e constatações, foram realizados corretamente.

No último procedimento, estimaram-se os assentamentos a ocorrer a partir de Março de 2016, para calcular as deformações volumétricas que ainda poderão ocorrer após a última época de medições, assim como os que ainda poderão originar-se nas condutas do CAR a partir de Março de 2018.

Relativamente aos valores obtidos a partir de 2018, estes foram estimados no intuito de serem usados no dimensionamento de dispositivos de flexibilização das condutas, admitindo que serão colocados nesse ano. Nos resultados pôde constatar-se que o máximo valor de desnível se prevê ocorrer no ponto 180 de medição, localizado no abastecimento ao Grupo 2.

6 CONCLUSÃO

A presente dissertação focou-se num caso de estudo, numa Central termoelétrica construída no vale aluvionar no Baixo Mondego onde se registaram anomalias nas condutas do Circuito de Água de Refrigeração, após a entrada em funcionamento da instalação.

Uma vez que as aluviões são um solo do tipo mole com baixa consistência e compressibilidade elevada, traduzidas na apresentação de deformações volumétricas significativas quando sofrem carregamento, o objetivo principal da dissertação passou por estimar os assentamentos que poderão surgir até ao fim da vida útil da obra. Esta estimativa, que se realizou na tentativa de encontrar uma solução para os problemas ocorridos, foi efetuada através de métodos numéricos e baseando-se em dados provenientes de levantamentos topográficos.

Neste contexto, organizaram-se os trabalhos em dois capítulos principais. Inicialmente, no capítulo 4, apresentaram-se os desníveis já ocorridos na vedação da área da obra, no intuito de realçar a grandeza de assentamentos observados.

Desde Junho de 2012 até Agosto de 2016, foram detetados desníveis que variaram desde valores quase nulos até 41,6 milímetros, e que estes vão diminuindo em direção a Este da periferia. Verificou-se, nomeadamente, que o troço que apresentou mais assentamento foi a zona Sul da vedação da obra, coincidente com a área onde há maior presença de aluviões.

Relativamente ao capítulo 5, em que se procedeu às estimativas dos assentamentos nas condutas do CAR, primeiramente, constatou-se que ocorreu um assentamento diferencial entre as zonas da Central fundadas sobre estacas e as zonas construídas recorrendo a fundação direta.

Através de cálculos, usando as equações encontradas bibliograficamente e às quais foi necessário realizar algumas considerações, foi possível admitir que o solo de fundação já se encontra em fase de consolidação secundária e que o seu início ocorreu aproximadamente em Junho de 2011, na segunda época de medições topográficas. Procedeu-se, posteriormente, à estimativa dos assentamentos da superfície até Março de 2040, na qual se constatou que o maior valor de assentamento se manifestou nas condutas que abastecem o Grupo 2, também coincidentes com a zona onde há maior presença de aluviões.

No intuito de apresentar o valor de assentamento que poderá ocorrer nas condutas após uma intervenção em Março de 2018, por via da sua flexibilização por intermédio de tubos-biela, foi estimado o assentamento que poderá ocorrer a partir dessa data. Os resultados indicaram que o

assentamento máximo a ocorrer nesse intervalo de tempo será no ponto 180, igualmente localizado no abastecimento ao Grupo 2.

Com base em todos os valores obtidos, tanto nos levantamentos topográficos como nas estimativas, foi possível verificar aspetos abordados no capítulo 2 e 3, nomeadamente no que diz respeito às propriedades dos materiais encontrados em solos deste tipo. A evolução dos assentamentos e, especialmente, a grandeza do máximo valor estimado, comprova que o solo se encontra com baixa consistência e elevada compressibilidade, e que apresenta elevada quantidade de matéria orgânica, traduzida em assentamentos secundários significativos.

Concluindo, a presença de diferentes tipos de solo, na sua maioria aluviões pouco consolidados, aliada à existência de diferentes tipos de fundação em estruturas da Central, conduziu a assentamentos diferenciais em toda a zona da obra, que criaram esforços nas condutas do Circuito de Águas de Refrigeração culminando nas roturas sucedidas.

Os cálculos elaborados permitiram alcançar conclusões para todos os objetivos previamente apresentados, mas importa realçar que a escolha da estimativa dos assentamentos por via numérica, baseada em valores medidos, foi a solução encontrada face a um tipo de solo com propriedades diversas e face à falta de coeficientes e índices necessários à estimativa com base na bibliografia encontrada. Esta opção acarretou uma certa margem de erro, que foi desde o início tida em conta.

A dissertação permitiu entender a importância do estudo prévio dos solos encontrados nos locais das obras de Engenharia Civil e, principalmente, o estado em que estes se encontram e a previsão do seu comportamento quando sofrem novos carregamentos. Especialmente, na presença de solos com características similares às dos depósitos aluvionares, o tipo de preparação do solo e a escolha de fundações apropriadas ao tipo de construção é fulcral para evitar ocorrências menos desejadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Casagrande, A. (1948). *Classification and identification of soils*. Transactions, ASCE, Vol:113, p. 901.
- Coelho, P.A.L.F. (2000). *Caracterização Geotécnica de Solos Moles. Estudo do Local Experimental da Quinta do Foja (Baixo Mondego)*. Dissertação de Mestrado, FCTUC, Coimbra.
- Coelho, R., Ferreira, M. *Central de Ciclo Combinado de Lares : Estudo de Impacte Ambiental*. SIAIA (<http://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA1505/RNT1505.pdf>). 04-04-2017.
- EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A. (2016). *Central de Ciclo Combinado de Lares: Resultado da observação de estruturas*.
- Folque, J. (1987). *Introdução à Mecânica dos Solos*. LNEC, Lisboa.
- Google (<https://www.google.pt/maps/place/Lares,+3090-646+Figueira+da+Foz/@40.1389157,-8.8539931,11038m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0xd22462fb033f143:0xa00ebc04f7fd4c0!8m2!3d40.1267839!4d-8.7782562>). 16-05-2017
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geologia e Estatística (1999). *Glossário Geológico*. IBGE (<https://www.google.pt/search?q=biblioteca+ibge&oq=biblioteca+ibge&aqs=chrome..69i57j0l5.1968j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>). 19-06-2017
- Manuppella, G. *et al* (1976). *Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50000: Folha 19-C (Figueira da Foz)*.
- Matos Fernandes, M. (2011). *Mecânica dos Solos: Introdução à Engenharia Geotécnica*, Vol: 2, FEUP edições, Porto.
- Matos Fernandes, M. (2012). *Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais*, Vol: 1, FEUP edições, Porto.
- Geotecnia da MOTA-ENGIL Engenharia e Construção, S.A. (2005). *Campanha de prospeção geológico - geotécnica no local onde está prevista a construção da nova Central de Ciclo Combinado de Lares*.
- Perloff, W.H. (1975). Pressure distribution and Settlement. In *Foundation Engineering Handbook*, Winterkorn & Fang, Editors, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Schmertmann, J. M. (1995). *The undisturbed consolidation of clay*. Transactions, ASCE, vol. 120, pp. 1201-1233.
- Som, N. N., Das, S.C. (2006). *Theory and Practice of Foundation Design*. Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi.
- Terzaghi, K. (1923a). *Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus Dem Verlauf der Hydrodynamischen Spannungserscheinungen*. Akademie der Wissenschaften in Wien, Vol:132, pp.125-138.
- Terzaghi, K. (1923b). *Die Beziehungen zwischen Elastizität und Innendruck*. Akademie der Wissenschaften in Wien, Vol:132, pp. 105-124.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- Terzaghi, K. *et al*. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, New York.

